

Pérez Montiel, J.; Escobar Villanueva, J.; Nardini, A. Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones

Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones

Pérez Montiel, Jhonny I. ¹ Escobar Villanueva, Jairo R. ¹ Nardini, Andrea Gianni Cristoforo ²

¹ Universidad de La Guajira, Colombia

² Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas Acuáticos, Riohacha-Colombia

ORCID: Pérez Montiel 0000-0003-0826-5452 Escobar Villanueva 0000-0002-2558-3500 Nardini 0000-0002-8486-7597

Correspondencia: jpemon@uniguajira.edu.co jrescobar@uniguajira.edu.co nardiniok@gmail.com

RESUMEN

La creciente vulnerabilidad en las zonas deltaicas se agrava por la variabilidad climática. Este estudio integra teledetección y modelación numérica para analizar la hidrodinámica de inundaciones en el delta del río Ranchería (norte de Colombia). La topografía se representó mediante un DEM fotogramétrico y refinado mediante observación remota y en terreno. El caudal de entrada se estimó a partir de una curva de gasto derivada de una estación limnimétrica en el límite aguas arriba del modelo. El nivel del mar se obtuvo con datos de un mareógrafo cercano. La calibración y validación del modelo hidrodinámico (IBER) se realizaron con mediciones de caudal y calado en box culverts representativos ubicados dentro y en la frontera del dominio. La extensión de la inundación se validó con imágenes multiespectrales PlanetScope. Para simular las alternativas de intervención, se modificó el DEM según las obras propuestas (RAS Mapper). Los indicadores de ajuste evidencian una calibración adecuada y la validación confirma la robustez del modelo. Tras el filtrado de la vegetación y las zonas no inundadas, se obtuvo una aceptable concordancia espacial ($Kappa \approx 0.75$). La simulación de las alternativas fue clave para evaluar la amenaza de inundación en función de viviendas afectadas, los calados máximos y las cotas alrededor de los diques.

Palabras clave: *modelo hidrodinámico, zona deltaica, inundaciones, amenaza, Imagen satelital*

Fecha de recepción: 24 enero 2026 · Fecha de aceptación: 24 enero 2026


Modelación hidrodinámica en zonas deltaicas para evaluar alternativas de solución a inundaciones

Pérez Montiel, Jhonny I. ⁽¹⁾, Escobar Villanueva, Jairo R. ⁽¹⁾, Nardini, Andrea Gianni Cristoforo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Universidad de La Guajira, Colombia.

 0000-0003-0826-5452, jpemon@uniguajira.edu.co ;  0000-0002-2558-3500, jrescobar@uniguajira.edu.co.

⁽²⁾ Fundación CREACUA—Centro Recuperación Ecosistemas Acuáticos, Riohacha-Colombia,

 0000-0002-8486-7597, nardiniok@gmail.com.

Resumen: La creciente vulnerabilidad en las zonas deltaicas se agrava por la variabilidad climática. Este estudio integra teledetección y modelación numérica para analizar la hidrodinámica de inundaciones en el delta del río Ranchería (norte de Colombia). La topografía se representó mediante un DEM fotogramétrico y refinado mediante observación remota y en terreno. El caudal de entrada se estimó a partir de una curva de gasto derivada de una estación limnimétrica en el límite aguas arriba del modelo. El nivel del mar se obtuvo con datos de un mareógrafo cercano. La calibración y validación del modelo hidrodinámico (IBER) se realizaron con mediciones de caudal y calado en box culverts representativos ubicados dentro y en la frontera del dominio. La extensión de la inundación se validó con imágenes multispectrales PlanetScope. Para simular las alternativas de intervención, se modificó el DEM según las obras propuestas (RAS Mapper). Los indicadores de ajuste evidencian una calibración adecuada y la validación confirma la robustez del modelo. Tras el filtrado de la vegetación y las zonas no inundadas, se obtuvo una aceptable concordancia espacial ($Kappa \approx 0.75$). La simulación de las alternativas fue clave para evaluar la amenaza de inundación en función de viviendas afectadas, los calados máximos y las cotas alrededor de los diques.

Palabras clave: modelo hidrodinámico, zona deltaica, inundaciones, amenaza, Imagen satelital.

Hydrodynamic modeling in deltaic areas to evaluate alternative solutions to flooding

Abstract: Increasing vulnerability in deltaic regions is exacerbated by climate variability. This study integrates remote sensing and numerical modeling to analyze flood hydrodynamics in the Ranchería River delta (northern Colombia). Topography was represented using a photogrammetric DEM, refined through remote sensing and field observations. Inflow discharge was estimated from a stage–discharge rating curve derived from a limnimetric station located at the upstream boundary of the model domain, while sea levels were obtained from a nearby tide gauge. Calibration and validation of the hydrodynamic model (IBER) were performed using discharge and water depth measurements at representative box culverts located within and along the domain boundaries. Flood extent was validated using PlanetScope multispectral imagery. Intervention alternatives were simulated by modifying the DEM according to proposed works (RAS Mapper). Performance metrics indicate satisfactory calibration, and validation confirms the robustness of the model. After filtering vegetation and non-flooded areas, an acceptable spatial agreement ($Kappa \approx 0.75$) was achieved. The simulation of alternatives was critical for assessing flood hazard in terms of affected dwellings, maximum water depths, and elevations around levees.

Keywords: hydrodynamic model, delta region, flooding, threat, satellite image.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas deltaicas enfrentan presiones crecientes derivadas en parte del cambio climático (CC) y crecimiento poblacional acelerado. Los modelos hidrodinámicos bidimensionales (2D) constituyen una herramienta clave para comprender, predecir y gestionar el riesgo de inundación. Estos modelos

permiten simular con mayor detalle espacial procesos de inundación de llanuras aluviales e interacción río–mar. (Cea & Costabile, 2022), No obstante, su confiabilidad depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada, tales como el modelo digital de elevación (DEM), los hidrogramas, el nivel del mar y la información temática del terreno. En este contexto, la teledetección desempeña un papel fundamental al proporcionar

información geoespacial clave para la modelación de inundaciones. Sin embargo, en regiones con limitada disponibilidad de datos, como el delta del río Ranchería, Caribe colombiano (Pérez *et al.*, 2018) la generación de estos insumos representa un desafío significativo.

La integración de sensores remotos fue fundamental para generar y ajustar un DEM fotogramétrico, así como para validar la extensión de la inundación. Esto permitió estimar la amenaza en distintos escenarios hidrológicos y de crecimiento poblacional, en un contexto de alta escasez de datos. En este trabajo se presenta la modelación hidrodinámica de alternativas de solución frente a inundaciones y se destaca el papel de la teledetección como herramienta clave de soporte.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El delta del río Ranchería se ubica al norte de Colombia (Fig.1), con una dinámica fluvio-marina compleja, habitado principalmente por indígenas wayuu.

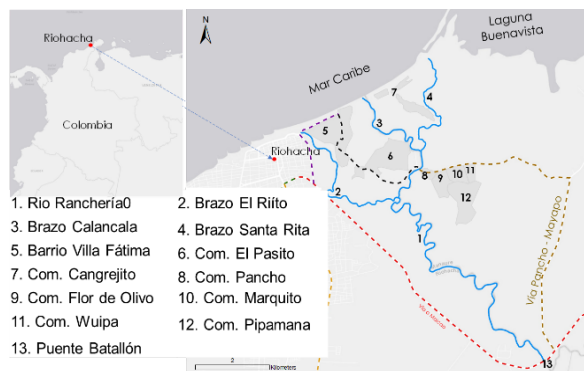


Figura 1. Delta del Ranchería, brazos y comunidades

2.1. DEM fotogramétrico

Se disponía de un DEM de resolución gruesa (10 m), suministrado por el Fondo de Adaptación de Colombia y generado a partir de imágenes aerotransportadas (2017). No obstante, presentaba limitaciones significativas, como baja resolución en zonas densamente vegetadas (especialmente en el corredor fluvial), presencia de artefactos y una representación inadecuada de la topografía hidráulicamente relevante. Por ello, se generó un nuevo DEM mediante fotogrametría (Agisoft Metashape®), actualizado a 2023, a partir de: (i) filtrado de vegetación mediante clasificación semiautomática de la nube de puntos; (ii) incorporación de nuevas vías y correcciones hidráulicas en diques, incluyendo box culvert no detectables por teledetección; (iii) validación altimétrica independiente mediante GNSS-RTK; y (iv) inserción del cauce principal y sus brazos, en gran medida no visibles en las imágenes. La mejora se evidencia en la reducción del RMSE de 0.991 m a 0.387 m al pasar del modelo digital de superficie (DSM) al DEM (terreno). Se observó una discrepancia del 11,7 % en el perfil longitudinal del cauce del río con respecto a las secciones transversales medidas en campo. Este proceso y sus resultados se documenta en Escobar Villanueva *et al.*, (2025).

Esta fue la única forma con que la modelación 2D logró brindar un comportamiento dinámico conforme con las observaciones realizadas en campo y con imágenes satelitales de Google Earth y PlanetScope. Luego, el DEM resultante fue modificado con la herramienta RAS Mapper (Brunner, 2023) para representar y obtener un DEM en cada alternativa de solución considerada (sección 2.4), incorporando conexiones a meandros abandonados o paleo-cauces (madres viejas) e insertando o eliminando terraplenes de protección, etc. Los box culvert se incorporaron a través de la centerline, considerando las cotas en los extremos, y los polígonos se usaron para las madres viejas, terraplenes y vías, con elevaciones específicas que permiten representar su función como barreras o zonas preferenciales de flujo.

2.2 Condiciones hidráulicas

Ante la inoperatividad de la estación hidrométrica más cercana (≈ 16 km), se instaló un limnómetro en la entrada del modelo (Puente Batallón) y, mediante topografía, se construyó la relación caudal-nivel $Q(h)=A(h)v(h)$ a partir de mediciones con el método del flotador. Con los niveles registrados en eventos de crecida de 2022 se definió el hidrograma requerido a la entrada del modelo. La condición de salida se estableció con datos del mareógrafo de Ballenas (DIMAR), ajustados altiméricamente con un limnómetro instalado por nuestro equipo en la desembocadura del brazo El Riito, aplicando una corrección de -14.12 cm.

La condición inicial en rigor es desconocida, pero seguramente cercana a una condición de estiaje, se suplió garantizando un intervalo de tiempo de 48 horas suficientes para el “warm up” del modelo. La precipitación se excluyó debido a la limitada disponibilidad de datos -solo diarios-, vacíos durante los eventos considerados y su baja sensibilidad hidrodinámica preliminar.

2.3 Calibración y validación del modelo

Se adoptó la teledetección para definir y actualizar las coberturas de uso del suelo y definir los coeficientes de Manning (n) y el número de curva (NC). Este último se estimó según el tipo y cobertura del suelo para representar la infiltración (Díaz Carvajal & Mercado Fernández, 2017). Pese a excluir la precipitación, el NC se consideró para estimar la pérdida por infiltración por inundación fluvial. IBER fue el modelo 2D elegido para el análisis hidrodinámico del delta. La calibración (2023) inició evaluando la sensibilidad “ n ” y NC independientemente y luego en conjunto. El mejor desempeño se obtuvo con un incremento del 15% en “ n ” y NC inicial, configuración que se utilizó en la validación (2022 y 2024). El desempeño del modelo se evaluó mediante indicadores de ajuste, comparando caudales y profundidades simulados y medidos en *box culvert* representativos, ubicados dentro del dominio y en sus fronteras. La extensión de la inundación se evaluó mediante la comparación entre imágenes PlanetScope y los resultados del modelo, utilizando el índice de Kappa (Ahmad *et al.*, 2025; Hostache *et al.*, 2018) complementado con verificación en campo en zonas con vegetación densa y áreas con confusión espectral, especialmente suelos desnudos. Antes de los ajustes, Kappa era ≈ 0.20 . Aunque el índice presenta limitaciones

(sensibilidad a la distribución de clases y bajo desempeño en conjuntos desbalanceados), no se emplearon métricas alternativas (p. ej., F1-score, precisión, recall) que proporcionan una evaluación más informativa de la evaluación de la exactitud de la clasificación, aunque estudio comparativo entre estos dos índices han encontrado resultados similares (Ahmad *et al.*, 2025). Considerando que las deficiencias en los datos eran lejos más importantes que las deficiencias estructurales del índice, se implementó un procedimiento bien estructurado así: (i) exclusión de áreas con vegetación densa no detectables por satélite; (ii) inclusión de zonas inundadas confirmadas por trabajo de campo o reportes locales; y (iii) exclusión de áreas clasificadas como inundadas que correspondían a cotas no inundables o a suelos húmedos.

2.4 Simulación de alternativas

Las alternativas, diseñadas de manera participativa, se simularon para evaluar la reducción de la amenaza y, con ella, el riesgo. Se consideraron: i) "ALT_0" (condición actual con crecimiento demográfico), ii) "NATURAL"

(restablecimiento de la dinámica hidráulica eliminando todos los obstáculos, sin nuevas protecciones y con re conexión de cuerpos hídricos ahora desconectados), iii) "INGENIERIL" (basada en obras de protección, o sea diques alrededor de los asentamientos), iv) "MIXTA" (combinación de medidas estructurales y naturales) y v) APTA (convivencia con la inundación sin realizar nuevas protecciones, pero apuntándole a la adaptación de vivienda, o sea su elevación o sellado, realización de "caminos secos" peatonales y otras adecuaciones para evitar el aislamiento). Su simulación se efectuó bajo escenarios sin y con cambio climático proyectado a 2100 (incremento del caudal en 30% y nivel medio del mar en 75 cm).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Calibración y validación del modelo

En la Tabla 1 se presentan los indicadores de ajuste obtenidos en la calibración y validación del modelo.

Tabla 1. Indicadores de ajuste en la validación y calibración del modelo

Indicador	Calibración, 2023		Validación 2022		Validación 2024	
	Caudales	Calados	Caudales	Calados	Caudales	Calados
BIAS unitario	-0.90	0.01	-2.17	0.35	-0.82	-0.14
PBIAS	-15.28	1.57	-11.64	21.70	-16.59	-17.06
RMSE	1.97	0.44	0.00	0.52	1.60	0.46
Var. explicada	0.98	0.64	1.00	0.81	0.98	0.63
NSE	0.97	0.64	0.90	0.64	0.97	0.61
R ²	0.98	0.87	1.00	0.99	0.98	0.82
Balance Q (m ³ /s)	-14.38	NA	-8.67	NA	-13.04	NA
Kappa (Planet)	0.75		0.77		0.73	

La Figura 2 presenta mapas binarios de inundación (agua/no agua) que comparan el producto derivado de teledetección con los resultados del modelo para el evento de 2023, evidenciando una concordancia espacial consistente con los valores aceptables del índice de Kappa. La buena concordancia espacial (Kappa 0.73–0.77) están cercanos a los reportados en la literatura (Ahmad *et al.*, 2025; Berezowski *et al.*, 2024; Hostache *et al.*, 2018). Los resultados de calibración y validación evidencian un desempeño robusto del modelo hidrodinámico, con PBIAS aceptable (López-Bermeo *et al.*, 2022), altos valores de NSE y R² especialmente en caudales; bajos valores de RMSE, esto indica una adecuada representación hidrodinámica (El Gharamti *et al.*, 2024). Las variaciones del RMSE se deben a la sensibilidad de este indicador (An & Ouyang, 2025). El menor desempeño para el calado indica que el modelo no logra mantener la coherencia vertical, un comportamiento reportado por Kuanestani *et al.* (2025).

3.2 Simulación de alternativas

Los mapas de inundación de cada alternativa permitieron evaluar criterios como: número de viviendas inundadas con diferentes calados (>10, 50, 100 cm); número de viviendas aisladas; proxy del riesgo residual asociado al posible colapso de los diques, etc.. Como

ejemplo (Fig. 3), la ALT_0 muestra inundación generalizada, que se intensifica bajo el escenario de cambio climático. La alternativa APTA fue la más favorable en términos técnicos, ambientales y socioculturales.

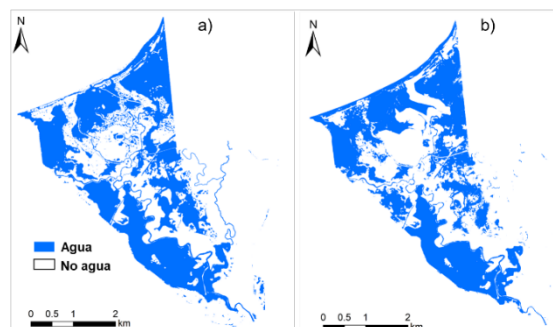


Figura 2. Mapa binario de inundación evento 2023: a) producto modelación 2D, b) teledetección (PlanetScope).

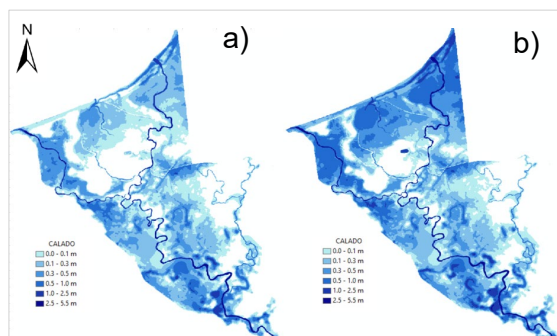


Figura 3. Simulación alternativa_0: a) sin, b) con CC.

4. CONCLUSIONES

A pesar de no contar con insumo geoespaciales oficiales de detalles, se logró obtener a partir de la teledetección un DEM aerofotogramétrico robusto e información semántica como máscara de inundación, apoyo esencial para la modelación hidrodinámica 2D. La estrategia se articuló en varias acciones que, en su conjunto, nos permitieron producir un DEM coherente con las observaciones remota y de campo.

Gracias a las imágenes satelitales (PlanetScope), y las mediciones de caudales y niveles en box culvert realizadas por el equipo durante eventos de crecida, se pudo calibrar y validar con éxito el modelo hidrodinámico. A pesar de las limitaciones estructurales del índice Kappa, resultó particularmente útil, acompañado por diversos otros indicadores de desempeño para evaluar la prestación del modelo 2D.

La simulación de las alternativas permitió cuantificar la amenaza y el riesgo. La propuesta APTA resultó óptima en términos técnicos y socioambientales, al priorizar la adaptación mediante arquitectura palafítica, viaductos peatonales y conectividad resiliente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Conv. 890-2020, Proy. 82207), recursos administrados por el ICETEX. Al Fondo de Adaptación de Colombia por las aerofotografías base del DEM, y a la DIMAR (datos mareógrafo). En general a todo el equipo de trabajo del proyecto Delta del Ranchería.

6. REFERENCIAS

Ahmad, I., Farooq, R., Ashraf, M., Waseem, M., & Shangquan, D. (2025). Improving flood hazard susceptibility assessment by integrating hydrodynamic modeling with remote sensing and ensemble machine learning. *Natural Hazards*, *121*(7), 7839–7868. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07109-2>

An, H., & Ouyang, C. (2025). A hybrid framework for real-time flash flood forecasting in small ungauged catchments: integrating hydrodynamic simulations with LSTM networks. *Journal of Hydrology*, *661*, 133688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133688>

Berezowski, T., Niemiec, S., & Chybicki, A. (2024). Floodsar: Automatic mapping of river flooding extent from multitemporal SAR imagery. *SoftwareX*, *26*, 101717. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.softx.2024.101717>

Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual (6.4)*. Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, *9*(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>

Díaz Carvajal, Á., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. *Ingeniería y Desarrollo*, *35*(2), 452–470.

El Gharamti, M., Rafieeiniasab, A., & McCreight, J. L. (2024). Leveraging a novel hybrid ensemble and optimal interpolation approach for enhanced streamflow and flood prediction. *Hydrology and Earth System Sciences*, *28*(14), 3133–3159. <https://doi.org/10.5194/hess-28-3133-2024>

Escobar Villanueva, J. R., Pérez-montiel, J. I., & Nardini, A. G. C. (2025). *DEM Generation Incorporating River Channels in Data-Scarce Contexts: The “Fluvial Domain Method”*. *12*(2), 1–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology12020033>

Hostache, R., Chini, M., Giustarini, L., Neal, J., Kavetski, D., Wood, M., Corato, G., Pelich, R.-M., & Matgen, P. (2018). Near-Real-Time Assimilation of SAR-Derived Flood Maps for Improving Flood Forecasts. *Water Resources Research*, *54*(8), 5516–5535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2017WR022205>

Kuhanestani, P. K., Bomers, A., Booij, M. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2025). Hydraulic river model calibration and validation for comprehensive hydrograph simulation: Evaluating accuracy across discharge ranges. *Journal of Hydrology*, *660*, 133210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133210>

López-Bermeo, C., Montoya, R. D., Caro-Lopera, F. J., & Díaz-García, J. A. (2022). Validation of the accuracy of the CHIRPS precipitation dataset at representing climate variability in a tropical mountainous region of South America. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *127*(July 2021), 103184. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103184>

Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*, *29*(4), 143–156. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400143>