

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DINÁMICA DE INUNDACIÓN EN ESTUARIOS DE PEQUEÑA ESCALA: ROL DE
LA BARRA LITORAL Y DEL HIDROGRAMA**

KARINA SOTO RIVAS. ¹
RAÚL FLORES AUDIBERT. ²

RESUMEN

Los estudios de inundación en estuarios de pequeña escala suelen centrarse únicamente en el caudal máximo, sin considerar en detalle otras variables hidrológicas ni las características morfológicas del sistema. En particular, la forma del hidrograma y la presencia de barras litorales pueden modificar significativamente la respuesta del estuario ante eventos extremos de crecidas, sin embargo, su efecto ha sido poco estudiado. Este trabajo evalúa cómo estas variables afectan la extensión y profundidad de la inundación en el estuario del río Maipo ubicado en Chile central, utilizando simulaciones numéricas con el modelo Telemac-2D y su módulo de transporte de sedimentos, GAIA.

Se analizaron 16 hidrogramas reales y sintéticos con distintos períodos de retorno (2, 5, 10 y 50 años), y se compararon configuraciones con y sin barra litoral. Los resultados muestran que el caudal máximo es el principal determinante de la extensión y profundidad máxima de la inundación. En cambio, el volumen total del hidrograma influye en la duración del evento y en la erosión de la barra litoral. La forma del hidrograma (duración y tasa de crecimiento) tuvo un efecto secundario en este sistema de topografía plana.

La presencia de una barra litoral amplifica significativamente la inundación en crecidas de baja recurrencia (2–10 años), pero su efecto disminuye en eventos más extremos, donde la barra es erosionada completamente. La omisión de esta morfología en evaluaciones de riesgo podría subestimar las áreas afectadas por inundación. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de incorporar la dinámica morfológica en los estudios de riesgo en estuarios pequeños con barra, representativos de los de Chile central.

¹Profesora Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - email: karina.soto@usm.cl

²Profesor Asociado, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María - email: raul.flores@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de inundación son fundamentales para la gestión del riesgo de desastres, ya que permiten delimitar zonas expuestas, estimar profundidades máximas de agua y establecer frecuencias de ocurrencia (Ali et al., 2016). Para lograr estimaciones precisas, estos análisis deben considerar múltiples factores, incluyendo la geomorfología local, el régimen hidrológico, la hidrodinámica fluvial y las condiciones meteorológicas (Dung et al., 2022). Sin embargo, muchos estudios ambientales se basan en modelos simplificados que no capturan adecuadamente la complejidad de sistemas específicos (Kumar et al., 2023).

Los estuarios son zonas de transición entre ambientes fluviales y marinos, con dinámicas complejas que resultan de la interacción entre caudal, mareas, oleaje y morfología local (?). En particular, los estuarios de pequeña escala con barra litoral, comunes en la costa de Chile central y en otras regiones de clima mediterráneo, presentan restricciones morfológicas en la desembocadura que pueden amplificar los niveles de inundación y profundidad durante crecidas (Feysat et al., 2022). Estos sistemas albergan ecosistemas valiosos y sostienen actividades económicas y sociales relevantes (Martínez et al., 2007), lo que refuerza la necesidad de caracterizar adecuadamente su respuesta ante eventos extremos.

Las metodologías tradicionales para modelar inundaciones suelen apoyarse en análisis de frecuencia para definir caudales de diseño (Cavalcanti and Reis, 2017), y algunos emplean hidrogramas sintéticos simplificados. Aunque se han propuesto múltiples técnicas para generar hidrogramas realistas (Mediero et al., 2010; Lacko et al., 2022; Hansford et al., 2020), muchos estudios utilizan un solo hidrograma representativo por caudal máximo, ignorando la influencia de otras características como el volumen total, la duración del evento o la relación entre el tiempo al caudal máximo y la duración total (Chu et al., 2020).

En sistemas estuarinos, la relación entre la forma del hidrograma y la extensión de la zona inundada ha sido poco explorada. A ello se suma la escasez de estudios sobre el rol de las barras litorales, debido a la dificultad de medir el transporte de sedimentos y los cambios morfológicos durante eventos de crecida (Yager et al., 2015). Algunos trabajos han demostrado que la altura de la barra puede tener mayor efecto sobre la profundidad máxima que la variabilidad del caudal (Takebayashi et al., 2007), mientras que otros destacan que es la magnitud del caudal la que determina su remoción (Taniguchi et al., 2021). Aunque los estudios que vinculan directamente la forma del hidrograma con la remoción de barras son escasos, investigaciones sobre transporte de sedimentos bajo caudales no estacionarios ofrecen conclusiones relevantes. Por ejemplo, Phillips et al. (2018) concluyó que el volumen total del hidrograma domina el transporte, independiente del valor pico y de su duración, mientras que Li et al. (2018) y Plumb et al. (2020) identificaron como factores clave la duración del evento y la no estacionariedad del caudal, respectivamente. Estas discrepancias evidencian la complejidad del fenómeno y la necesidad de mayor investigación.

En este trabajo se analiza la dinámica de inundación del estuario del río Maipo, en Chile central, caracterizado por tener una barra litoral dinámica al igual que muchos estuarios de la zona. Mediante simulaciones con el modelo Telemac-2D y su módulo de transporte de sedimentos, GAIA, se evalúan distintos escenarios con hidrogramas reales y sintéticos, y configuraciones con y sin barra litoral. Se busca identificar los factores que controlan la extensión y profundidad de la inundación, así como evaluar el rol de la barra litoral ante crecidas de distinta magnitud.

2. METODOLOGÍA

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El río Maipo se ubica en la zona central de Chile y drena una cuenca de 15.000 km², incluyendo la ciudad de Santiago. A pesar de su gran extensión, el caudal medio anual en su desembocadura ha disminuido a menos de 30 m³/s en las últimas décadas debido a extracciones y a una megasequía prolongada (Garreaud et al., 2020). El estuario presenta un régimen pluvio-nival, con crecidas intensas asociadas a precipitaciones frontales y ríos atmosféricos (Campos and Rondanelli, 2023, e.g.). La desembocadura está caracterizada por una barra litoral de arena gruesa que restringe el flujo hacia el océano y modula la circulación y salinidad del sistema (Soto-Rivas et al., 2024).

Durante una campaña en septiembre de 2021 se midieron niveles, salinidad y caudal bajo condiciones de bajo flujo. Se instalaron sensores CTD en el canal principal y en el humedal intermareal, y se midió el caudal con transectos usando un ADCP. Estas mediciones se usaron para validar el modelo numérico (ver Figura 1).

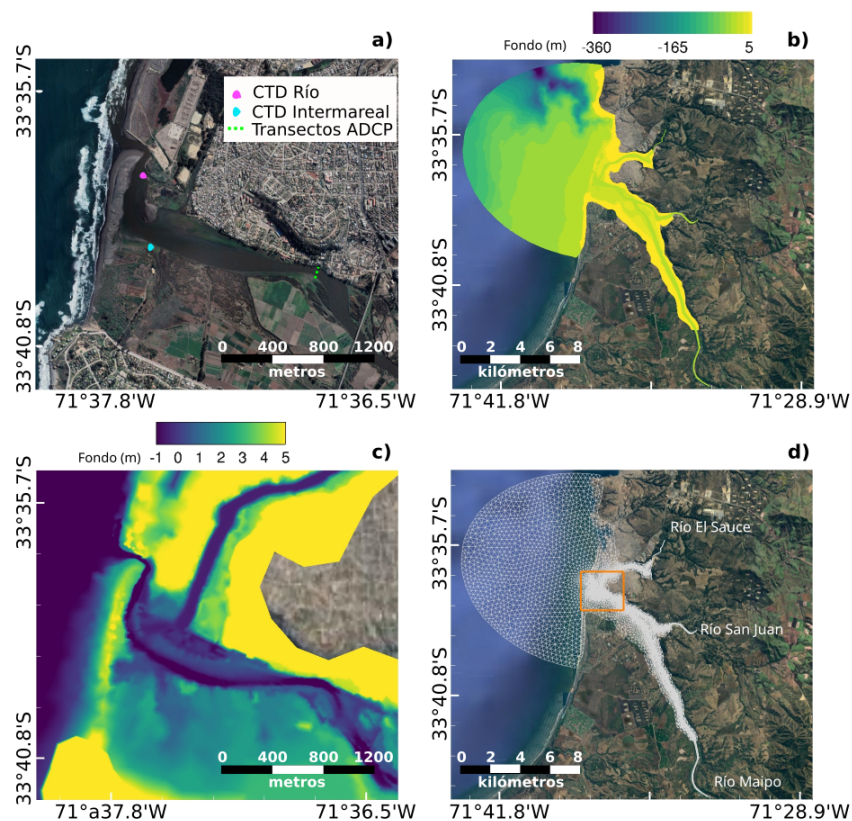


Figura 1: a) Desembocadura del Río Maipo indicando la posición de los instrumentos en la campaña en terreno. b) Topo-batimetría del dominio para la simulación representativa de la campaña en terreno. c) Zoom de la topo-batimetría de la barra litoral utilizada para las simulaciones de la campaña en terreno. d) Dominio computacional utilizado en todas las simulaciones.

2.2. MODELO NUMÉRICO

Se utilizó el modelo Telemac-2D, que resuelve las ecuaciones de aguas someras sobre una malla no estructurada mediante el método de elementos finitos (Galland et al., 1991). Para incluir la evolución morfológica de la barra litoral, se empleó el módulo GAIA, que resuelve la ecuación de Exner e incluye formulaciones para el transporte de sedimentos no cohesivos. Se usó la fórmula de Wilcock y Crowe (Wilcock and Crowe, 2003) con sedimentos de $d_{50} = 0,4$ mm y densidad de 1600 kg/m^3 (Gaete et al., 2017).

La malla cubre 15 km aguas arriba de la desembocadura y 9 km mar adentro, con mayor resolución en la zona estuarina. Mar adentro se impuso una condición de borde de elevaciones calculadas usando un análisis armónico de las mareas medidas por el SHOA. Aguas arriba del Maipo se impusieron condiciones de descarga variable, mientras que en los afluentes San Juan y El Sauce se impusieron caudales constantes. La fricción se modeló mediante el coeficiente de Manning igual en todo el dominio ($n = 0,05$) y para la turbulencia se utilizó el modelo de cierre $k-\varepsilon$.

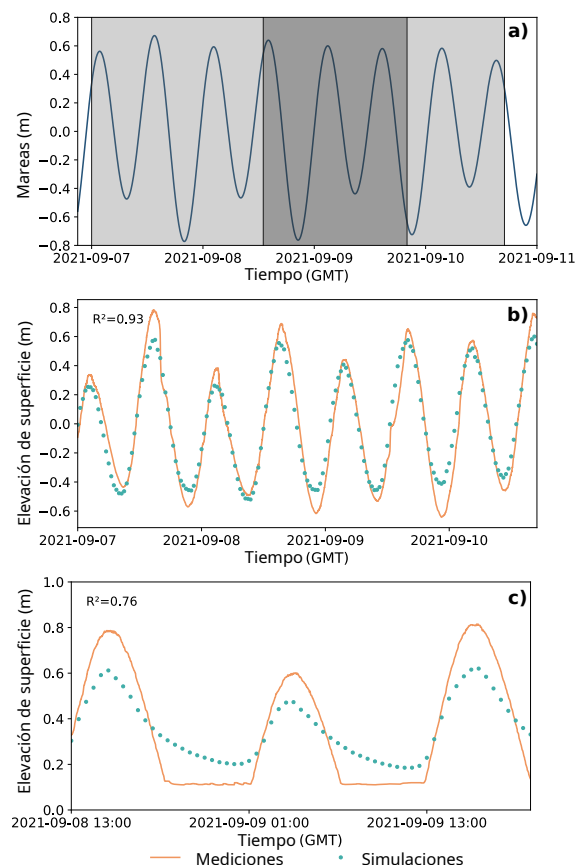


Figura 2: a) Elevación de marea correspondientes a la campaña en terreno utilizadas como condición de borde mar adentro. La zona sombreada en gris claro indica el periodo de medición en la zona del río, mientras que la zona gris oscura marca el periodo de medición en la zona intermareal. b) Comparación entre las elevaciones de la superficie libre medidas y simuladas en la zona del río. c) Comparación entre las elevaciones de la superficie libre medidas y simuladas en la zona intermareal.

Tabla 1: Características principales de los hidrogramas simulados

Caso	Periodo de retorno (años)	Q_{peak} (m^3/s)	Volumen ($\times 10^6 m^3$)	Duración (días)	t_p/D
T2 a1	2	777	283	8.51	0.36
T2 a2	2	777	371	8.51	0.36
T2 b1	2	777	485	12.80	0.57
T2 b2	2	777	578	12.80	0.57
T2 c1	2	777	116	7.98	0.31
T2 c2	2	777	291	7.98	0.31
T5 a1	5	1793	283	7.82	0.30
T5 a2	5	1793	660	7.82	0.30
T5 b1	5	1793	341	8.13	0.33
T5 b2	5	1793	696	8.13	0.33
T5 c1	5	1793	325	6.60	0.17
T5 c2	5	1793	574	6.60	0.17
T10 a1	10	2776	508	6.48	0.15
T10 a2	10	2776	872	6.48	0.15
T50 a1	50	5982	1700	11.57	0.53
T50 a2	50	5982	3160	11.57	0.53

2.3. VALIDACIÓN

El modelo fue validado reproduciendo condiciones de la campaña en terreno, con un caudal constante de $12 m^3/s$. La comparación entre datos medidos y simulados mostró buena concordancia en niveles de agua en ambas estaciones, con coeficientes R^2 de 0.93 y 0.76 en el canal y el humedal, respectivamente (ver Figura 2).

2.4. DISEÑO DE LAS SIMULACIONES

Se simularon 16 hidrogramas (ver Figura 4 y Tabla 1), reales y sintéticos, con periodos de retorno, $T = 2, 5, 10$ y 50 años. Las variables exploradas fueron el caudal máximo, Q_{peak} , volumen total, duración y relación tiempo al caudal máximo sobre duración total (t_p/D). Para evaluar el rol de la barra litoral, se compararon tres configuraciones: sin barra, con una barra baja (2.25 m de altura máxima) y con una barra alta (4.5 m de altura máxima), basadas en la topografía observada.

La evolución de la barra fue simulada implementando el modelo morfodinámico de TELEMAC-2D, GAIA. Todas las simulaciones incluyeron un periodo de acondicionamiento de tres días antes del inicio del hidrograma, durante el cual el módulo de transporte de sedimentos fue desactivado.

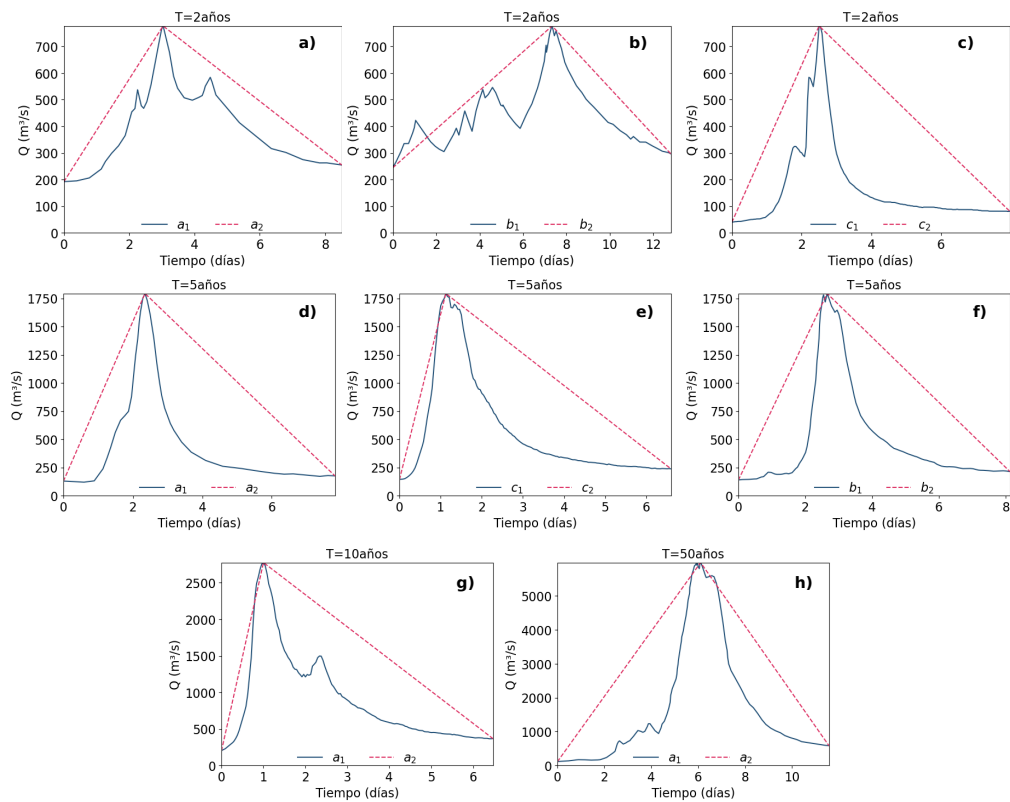


Figura 3: Hidrogramas usados como condición de borde aguas arriba del río Maipo, detallados en la Tabla 1. Paneles a), b), y c) muestran hidrogramas con caudales máximos de períodos de retorno de 2 años, d), e), y f) muestran aquellos con 5 años de periodo de retorno, g) indica hidrogramas con 10 años de periodo de retorno y h) muestra hidrogramas de 50 años de periodo de retorno. Las líneas continuas azules muestran hidrogramas reales medidos, mientras que las líneas discontinuas rosadas representan hidrogramas sintéticos.

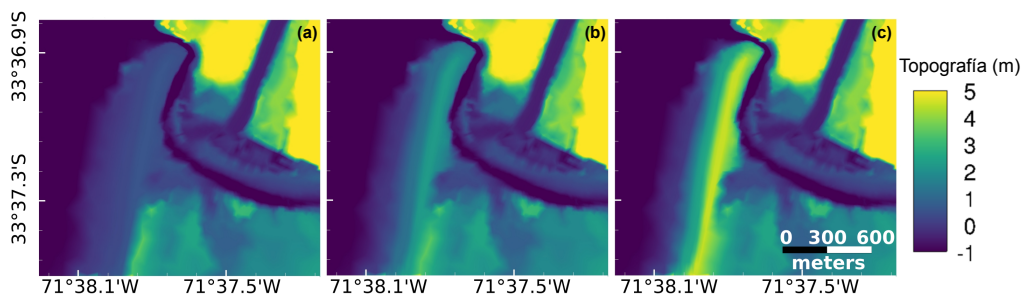


Figura 4: Topografía del dominio computacional utilizada en: a) casos sin barra, donde se busca aislar el efecto de los hidrogramas, b) casos con barra baja y c) casos con barra alta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. EFECTO DEL HIDROGRAMA

La Figura 5 muestra la extensión máxima de inundación y la correspondiente profundidad de agua para distintos caudales de crecida, considerando hidrogramas reales (paneles superiores) y sintéticos (paneles inferiores), teniendo estos últimos volúmenes de descarga muy superior. Las diferencias entre ambos tipos de hidrograma son mínimas en cuanto a área y profundidad máxima, incluso cuando el volumen varía considerablemente. En todos los casos, el caudal máximo domina la respuesta del sistema. Las variables duración total (D) y la razón entre tiempo al máximo y duración total (t_p/D) tampoco mostraron un efecto significativo en la extensión ni en la profundidad máxima (no mostrado aquí). Adicionalmente, al comparar los resultados con una simulación usando caudal constante igual al máximo de los hidrogramas, se observaron diferencias menores a 10 cm para $T = 2$ años, y diferencias aún menores para eventos de mayor magnitud (no mostrado aquí).

Estos patrones fueron confirmados mediante un análisis estadístico (no mostrado), donde el caudal máximo presentó una correlación de rangos de Spearman fuerte ($\rho = 0,95$) con la extensión y la profundidad máxima de la inundación. En cambio, el volumen del hidrograma mostró mayor correlación con el área y la profundidad máxima promediadas en el tiempo, lo que sugiere que el volumen está más relacionado con la persistencia de la inundación que con su magnitud. Las variables t_p/D y duración total no presentaron correlaciones significativas, lo que indica que su influencia es marginal en este sistema de topografía plana.

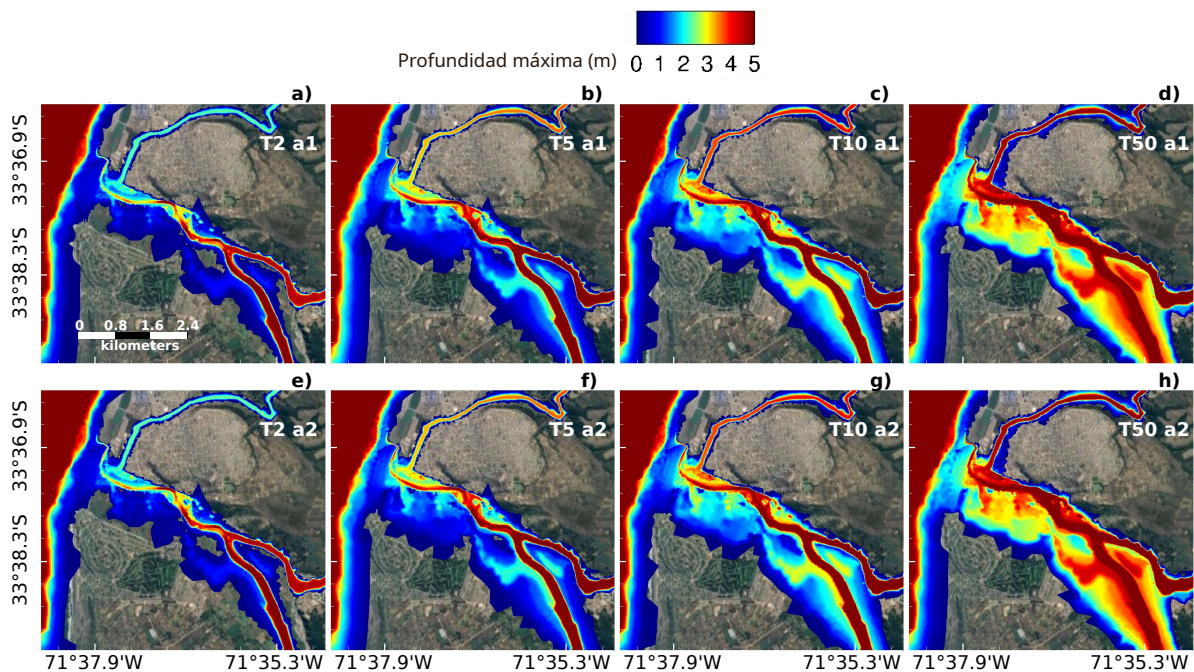


Figura 5: Máxima extensión del área inundada y su correspondiente profundidad de agua para las crecidas con $T = 2, 5, 10,$ y 50 años para los casos sin barra litoral. Los paneles superiores muestran los resultados para las crecidas con hidrogramas reales, mientras que los paneles inferiores, muestran casos con hidrogramas sintéticos, destacados por tener un mayor volumen.

3.2. EFECTO DE LA BARRA LITORAL

La presencia de una barra litoral amplifica significativamente el área inundada durante eventos de baja magnitud. La Figura 6 muestra que, para crecidas con $T = 2$ años, la barra incrementa la inundación en zonas aguas arriba del estuario. En cambio, en eventos de mayor magnitud, este efecto disminuye progresivamente hasta desaparecer con la crecida de 50 años, la cual remueve completamente la barra por erosión (ver Figura 7d). Estos resultados concuerdan con estudios previos que indican que eventos frecuentes no logran remover la barra y, por tanto, son más sensibles a su presencia (e.g., Annis et al., 2020) (ver Figura 7a,b). Cabe destacar que, aunque las simulaciones incluyeron diferentes tipos de hidrograma, estos no modificaron de forma apreciable la inundación máxima representada en la Figura 6 para un mismo tipo de barra.

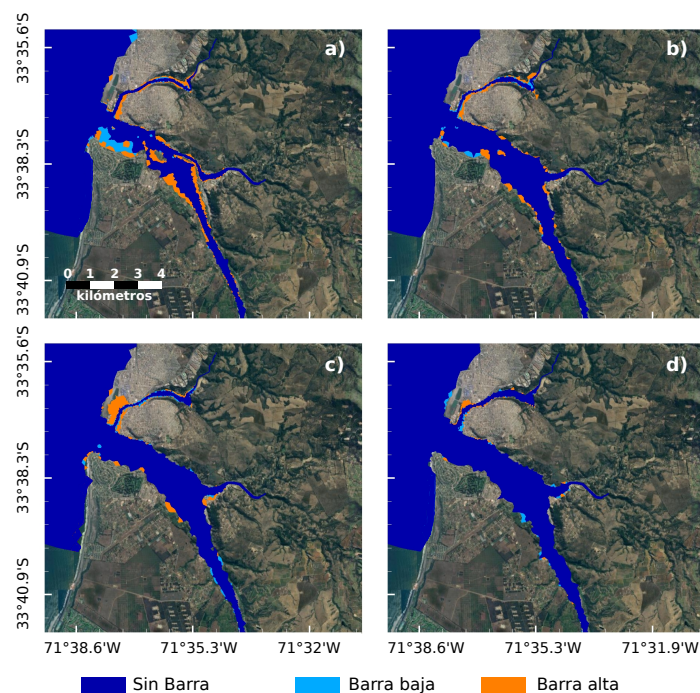


Figura 6: Extensión de la máxima área inundada para casos sin barra (azul), barra más baja (celeste), y barra más alta (naranja). a) Casos con crecidas de $T = 2$ años. b) Casos con crecidas de $T = 5$ años. c) Casos con crecidas de $T = 10$ años. d) Casos con crecidas de $T = 50$ años.

La Figura 7 muestra la evolución temporal porcentual del volumen de la barra litoral para los distintos hidrogramas y periodos de retorno. La barra baja es más susceptible a la erosión que la barra alta, y su remoción está fuertemente influenciada por el volumen del hidrograma. Al comparar los hidrogramas reales (a_1) con los sintéticos de mayor volumen (a_2), se observa una mayor pérdida de sedimentos en estos últimos. Además, la mayor parte de la erosión ocurre después del caudal máximo, lo que indica un desfase temporal entre la inundación máxima y la máxima tasa de erosión. Por otro lado, no se observó un retraso en el momento de la inundación máxima debido a la presencia de la barra, lo que sugiere que su principal efecto es amplificar la magnitud del evento, sin alterar su sincronía (no mostrado aquí).

La Figura 8 resume el efecto combinado del caudal y la barra litoral. La relación entre el caudal máximo y el área inundada sigue una tendencia logarítmica, mientras que la profundidad

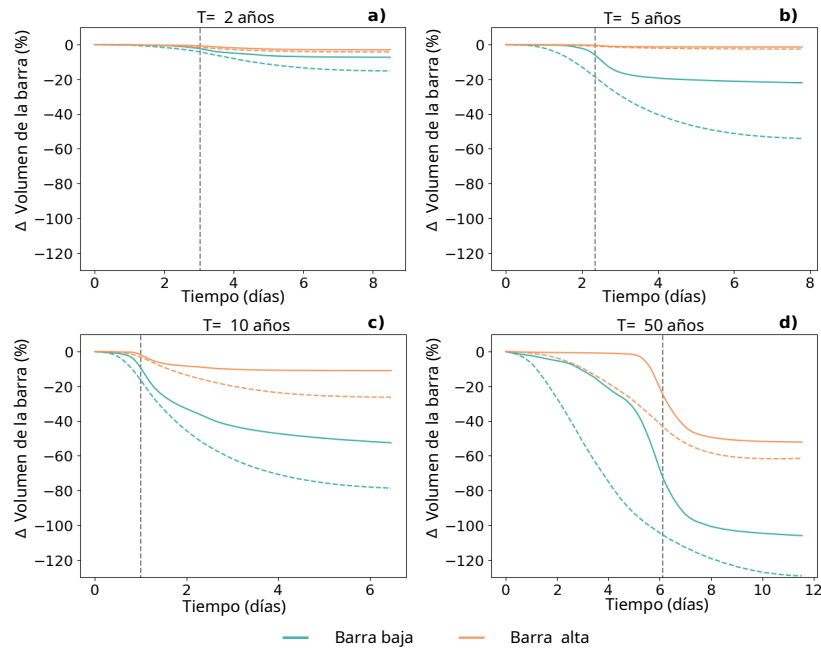


Figura 7: Series de tiempo del cambio porcentual en el volumen de las barras durante los hidrogramas con caudal máximo correspondientes a periodos de retorno de a) 2 años, b) 5 años, c) 10 años, y d) 50 años. Las líneas continuas corresponden a los hidrogramas reales (a_1), mientras que las líneas punteadas representan los hidrogramas sintéticos (a_2). La línea negra vertical indica el tiempo de la máxima descarga.

máxima crece de forma casi lineal. Las diferencias de profundidad entre configuraciones morfológicas son menores a 50 cm, lo que sugiere que el relieve plano favorece la expansión lateral, limitando la variación vertical. En contraste, el volumen del hidrograma mostró correlaciones más bajas con el área ($\rho = 0,58$) y la profundidad máxima ($\rho = 0,71$), lo que indica que, aunque el volumen controla la erosión de la barra, el caudal máximo sigue siendo la variable dominante para caracterizar la magnitud de la inundación.

4. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó la influencia de la forma del hidrograma y de la barra litoral sobre la dinámica de inundación en el estuario del río Maipo, representativo de estuarios de pequeña escala en climas mediterráneos. Mediante simulaciones numéricas con Telemac-2D y su módulo de transporte de sedimentos, GAIA, se analizaron distintos escenarios hidrológicos y configuraciones morfológicas.

Los resultados indican que el caudal máximo es el principal determinante de la extensión y profundidad máxima de la inundación. En cambio, el volumen del hidrograma incide principalmente en la duración del evento y en la erosión de la barra litoral. Variables como la duración total o la razón t_p/D tuvieron efectos marginales sobre las áreas afectadas.

La barra litoral incrementa significativamente la inundación en crecidas de baja recurrencia (2–10 años), pero su influencia desaparece en eventos extremos, donde es completamente erosionada. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar explícitamente la morfología de

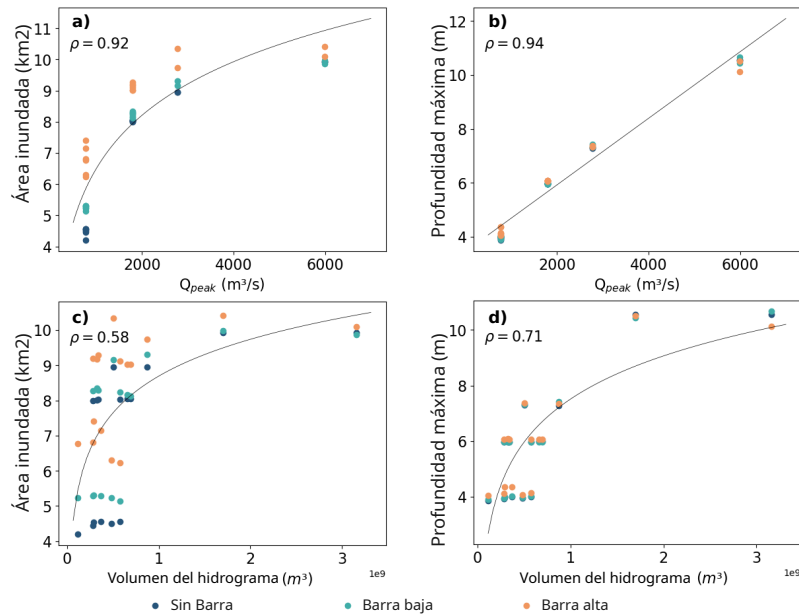


Figura 8: Área máxima inundada y profundidad máxima según el caudal máximo y el volumen del hidrograma para los casos sin barra (azul), con barra baja (celeste) y con barra alta (naranja). Se incluye la curva de mejor ajuste y el coeficiente de correlación de rangos de Spearman entre las variables de los ejes. a) y c) Área máxima inundada en función del caudal máximo y del volumen del hidrograma, respectivamente. b) y d) Profundidad máxima en la zona inundada según el caudal máximo y el volumen del hidrograma, respectivamente.

la desembocadura en estudios de riesgo de inundación, por sobre la caracterización detallada de la forma del hidrograma, especialmente en estuarios pequeños con relieve plano y barra litoral dinámica.

Futuros trabajos deberían incorporar análisis estadísticos sobre la presencia de barras y su composición granulométrica, con el fin de estimar áreas inundables y períodos de retorno de forma más realista.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del Centro de Investigación para la gestión integrada del riesgo de desastres, CIGIDEN (Proyecto 1522A005 FONDAP, 2022)

REFERENCIAS

- K. Ali, R. M. Bajracharya, and H. L. Koirala. A review of flood risk assessment. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 1(4):1065–1077, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/1.4.62>.
- A. Annis, F. Nardi, E. Volpi, and A. Fiori. Quantifying the relative impact of hydrological and hydraulic modelling parameterizations on uncertainty of inundation

- maps. *Hydrological Sciences Journal*, 65(4):507–523, 2020. ISSN 0262-6667. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1709640>.
- D. Campos and R. Rondanelli. Enso-related precipitation variability in central chile: The role of large scale moisture transport. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(17): e2023JD038671, 2023.
- D. L. O. Cavalcanti and L. F. R. Reis. Maximum design flow estimates for large basins using the local frequency analysis (lfa) and the most probable maximum hydrograph (mpmh) methods—a critical analysis. *Water resources management*, 31:127–141, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1514-4>.
- H. Chu, W. Wu, Q. Wang, R. Nathan, and J. Wei. An ann-based emulation modelling framework for flood inundation modelling: Application, challenges and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 124:104587, 2020. ISSN 1364-8152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104587>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815219307601>.
- N. B. Dung, N. Q. Long, R. Goyal, D. T. An, and D. T. Minh. The role of factors affecting flood hazard zoning using analytical hierarchy process: A review. *Earth Systems and Environment*, 6(3):697–713, 2022. doi: [10.1007/s41748-021-00235-4](https://doi.org/10.1007/s41748-021-00235-4).
- P. Feyssat, R. Certain, N. Robin, O. Raynal, N. Aleman, B. Hebert, A. Lamy, and J.-P. Barusseau. Morphodynamic behaviour of a mediterranean intermittent estuary with opening phases primarily dominated by offshore winds. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12): 1817, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse10121817>.
- H. Gaete, M. Álvarez, G. Lobos, E. Soto, and C. Jara-Gutiérrez. Assessment of oxidative stress and bioaccumulation of the metals cu, fe, zn, pb, cd in the polychaete perinereis gualpensis from estuaries of central chile. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145: 653–658, 2017. ISSN 0147-6513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.073>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651317304955>.
- J.-C. Galland, N. Goutal, and J.-M. Hervouet. TELEMAC: A new numerical model for solving shallow water equations. *Advances in Water Resources*, 14(3): 138–148, 1991. ISSN 03091708. doi: [10.1016/0309-1708\(91\)90006-A](https://doi.org/10.1016/0309-1708(91)90006-A). URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/030917089190006A>.
- R. D. Garreaud, J. P. Boisier, R. Rondanelli, A. Montecinos, H. H. Sepúlveda, and D. Veloso-Aguila. The central chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1):421–439, 2020.
- M. R. Hansford, P. Plink-Björklund, and E. R. Jones. Global quantitative analyses of river discharge variability and hydrograph shape with respect to climate types. *Earth-Science Reviews*, 200:102977, 2020. ISSN 00128252. doi: [10.1016/j.earscirev.2019.102977](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102977). URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825218303945>.
- V. Kumar, K. V. Sharma, T. Caloiero, D. J. Mehta, and K. Singh. Comprehensive overview of flood modeling approaches: A review of recent advances. *Hydrology*, 10(7), 2023. ISSN 2306-5338. doi: [10.3390/hydrology10070141](https://doi.org/10.3390/hydrology10070141). URL <https://www.mdpi.com/2306-5338/10/7/141>.

- M. Lacko, K. Potočki, K. A. Škreb, and N. Bezak. Joint modelling of flood hydrograph peak, volume and duration using copulas—case study of sava and drava river in croatia, europe. *Water*, 14(16):2481, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/w14162481>.
- Z. Li, H. Qian, Z. Cao, H. Liu, G. Pender, and P. Hu. Enhanced bed load sediment transport by unsteady flows in a degrading channel. *International Journal of Sediment Research*, 33(3):327–339, 2018. ISSN 1001-6279. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.03.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627916300725>.
- M. L. Martínez, A. Intralawan, G. Vázquez, O. Pérez-Maqueo, P. Sutton, and R. Landgrave. The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63(2-3):254–272, 2007. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>.
- L. Mediero, A. Jiménez-Álvarez, and L. Garrote. Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12):2495–2505, 2010. doi: 10.5194/hess-14-2495-2010.
- C. Phillips, K. Hill, C. Paola, M. Singer, and D. Jerolmack. Effect of flood hydrograph duration, magnitude, and shape on bed load transport dynamics. *Geophysical Research Letters*, 45(16):8264–8271, 2018. doi: 10.1029/2018GL078976.
- B. D. Plumb, C. Juez, W. K. Annable, C. W. McKie, and M. J. Franca. The impact of hydrograph variability and frequency on sediment transport dynamics in a gravel-bed flume. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(4):816–830, 2020. doi: 10.1002/esp.4770.
- K. Soto-Rivas, R. P. Flores, M. Williams, and C. Escauriaza. Understanding salinity intrusion and residence times in a small-scale bar-built estuary under drought scenarios: The maipo river estuary, central chile. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7):1162, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse12071162>.
- H. Takebayashi, S. Egashira, H. Jin, and T. Sasaki. Water surface elevation at the upstream side of a river mouth sandbar during floods. *Journal of Coastal Research*, 50(sp1):700, 2007. doi: 10.2112/JCR-SI50-132.1. URL <https://doi.org/10.2112/JCR-SI50-132.1>.
- J. Taniguchi, K. Watanabe, and N. Saito. Investigation on the relationship between change of the river mouth sandbar and river discharge and ocean wave energy at omono river. *Geomate Journal*, 21(88):113–120, 2021. doi: <https://doi.org/10.21660/2021.88.gxi248>. URL <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/2832>.
- P. R. Wilcock and J. C. Crowe. Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2):120–128, 2003.
- E. Yager, M. Kenworthy, and A. Monsalve. Taking the river inside: Fundamental advances from laboratory experiments in measuring and understanding bedload transport processes. *Geomorphology*, 244:21–32, 2015. ISSN 0169-555X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15001993>. Laboratory Experiments in Geomorphology 46th Annual Binghamton Geomorphology Symposium 18-20 September 2015.