

Explorando la respuesta hidrodinámica de un río altamente perturbado por erupciones volcánicas: el Río Blanco, Chaitén (Chile)

Exploring the hydrodynamic response of a highly perturbed river due to volcanic eruptions: the Blanco River, Chaitén (Chile)

Bruno Mazzorana ^{1a*}, Diego Bahamondes ^b, Liz Montecinos ^c, Virginia Ruiz-Villanueva ^{1d} e Iván Rojas ^{1e}

^aInstituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Independencia 631#, 5090000, Valdivia, Los Ríos, Chile.

^bLaboratorio de Procesos Superficiales, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Independencia 631#, 5090000, Valdivia, Los Ríos, Chile.

^cEscuela de Graduados, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Independencia 631#, 5090000, Valdivia, Los Ríos, Chile.

^dInstitute of Earth Surface Dynamics (IDYST), Faculty of Geosciences and the Environment, University of Lausanne, Geopolis, UNIL-Mouline, CH-1015 Lausanne, Switzerland.

^eEscuela de Graduados, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile, Independencia 631#, 5090000, Valdivia, Los Ríos, Chile.

E-mail: ^abruno.mazzorana@uach.cl, ^bdiegopatriciobr@gmail.com, ^clizkaren1546@gmail.com, ^dVirginia.Ruiz-Villanueva@unil.ch, ^eivan.rojas@uach.cl

*Autor para correspondencia

Recibido: 25/11/2022

Aceptado: 03/04/2023

Publicado: 30/04/2023

Citar como: Mazzorana, B., Bahamondes, D., Montecinos, L., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, I. 2023. Exploring the hydrodynamic response of a highly perturbed river due to volcanic eruptions: the Blanco River, Chaitén (Chile). *Ingeniería del agua*, 27(2), 73-92. <https://doi.org/10.4995/la.2023.18866>

RESUMEN

En este trabajo se exploró la respuesta hidrodinámica del Río Blanco ante flujos trifásicos (agua, sedimento y madera), en un contexto de perturbación volcánica. La escasa información hidrológica dificulta el uso de métodos tradicionales, por lo que se definió una alternativa metodológica para determinar la peligrosidad de inundaciones a través de modelos numéricos (Iber) y el diseño de escenarios. Los resultados mostraron que el caudal necesario para el desborde del río varía entre 850 y 950 m³/s para flujos monofásicos (solo agua), mientras que para los flujos trifásicos el caudal fue mucho menor (entre 700 y 800 m³/s). Además, se observaron diferencias significativas en el área inundada entre los escenarios con distintas rugosidades y proporción de sedimento y madera en el flujo. Los resultados evidencian la gran complejidad y sensibilidad del sistema fluvial del Río Blanco.

Palabras clave | Chaitén; peligrosidad; flujos trifásicos, Iber; sensibilidad hidrodinámica.

ABSTRACT

This work explored the hydrodynamic response of the Blanco River to three-phase flows (water, sediment, and wood), in a context of volcanic disturbance. The scarce hydrological information makes the use of traditional methods difficult, so an alternative methodological approach was defined to determine the flood hazard through numerical modelling (Iber) and scenario design. The results showed that the discharge required to flood the town varied between 850 and 950 m³/s for single-phase flows (water only), while for three-phase flows the discharge was much lower (between 700 and 800 m³/s). In addition, significant differences in flooded areas were observed between scenarios with different roughness and proportion of sediment and wood in the flow. The results show the great complexity and sensitivity of the Rio Blanco River system.

Key words | Chaitén; hazardouness; thriphasic flows; Iber; hydrodynamic sensitivity.

INTRODUCCIÓN

Las erupciones volcánicas pueden alterar profundamente los sistemas fluviales (Major y Lara 2013; Basso-Baez *et al.*, 2020), perturbando los procesos erosivos y la pendiente del río, alterando la conectividad hidro-morfológica de la cuenca (Martini *et al.*, 2019), suministrando volúmenes considerables de sedimentos a través de remociones en masa, lahares y flujos piroclásticos (Major *et al.*, 2016; Korup *et al.*, 2019; Basso-Baez *et al.*, 2020). En los casos más severos, los ríos afectados por volcanismo presentan cambios en el equilibrio dinámico de los procesos de erosión y transporte, lo cual genera un considerable reajuste geomorfológico del corredor fluvial (Ulloa *et al.*, 2015; Mazzorana *et al.*, 2019), que influyen la manera en que los procesos en cascada se concadenan (Mazzorana *et al.*, 2019). Como consecuencia, los ríos presentan rápidos ciclos de agradación y ensanchamiento del corredor fluvial (Pierson *et al.*, 2013). Así como también influyen en gran medida en la hidrología local y regional alterando los patrones de drenaje (superficiales y subsuperficiales) en la cuenca que, a su vez, controlan los procesos geomorfológicos (Biermann y Montgomery, 2013). Estos procesos de gran magnitud pueden afectar los asentamientos humanos y entornos construidos, así como también generar impactos en la economía local (Fuchs *et al.*, 2017).

La vegetación arbórea del corredor fluvial y de las vertientes es expuesta a la dinámica de los flujos de ríos perturbados, generando una importante remoción de madera de gran tamaño (en inglés Large Wood o LW; ver Lisle, 1995; Ulloa *et al.*, 2015; Tonon *et al.*, 2017; Basso-Baez *et al.*, 2020), la cual puede ser transportada aguas-abajo originando flujos cargados de madera (Braudrick y Grant, 2001; Ravazzolo *et al.*, 2017; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2019). La madera de gran tamaño se puede presentar como troncos, raíces, ramas, y hasta arboles enteros que son arrastrados por la crecida (Lancaster *et al.*, 2003), e inciden en la dinámica de los sistemas fluviales. En conjunto con el transporte de material inorgánico, estos flujos incrementan considerablemente el riesgo para los asentamientos humanos (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2013; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014a, 2014b; Comiti *et al.*, 2016; Ravazzolo *et al.*, 2017; Steeb *et al.*, 2017; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2019), puesto que pueden: (i) obstruir secciones críticas del cauce y (ii) aumentar la resistencia al flujo al interactuar con el material sólido o debido a los continuos choques entre los elementos transportados (Mazzorana *et al.*, 2011; Mazzorana *et al.*, 2018). De forma similar que los sedimentos inorgánicos, el transporte de madera es un aspecto muy importante para entender las dinámicas de los flujos (Bladé y Ruiz-Villanueva, 2016a). Aunque puede haber similitudes entre el estudio de la dinámica de sedimento inorgánico y de madera, existe una diferencia notable en la variabilidad física (en términos de densidad, tamaño, forma, entre otros), el modo en que es transportado (chocando, saltando, girando, deslizándose y rodando) y la compleja relación entre aporte de madera al río y los caudales que la transportan, lo que añade cierta dificultad a su modelización (Gilbert, 1914; Braudrick *et al.*, 1997; Ruiz-Villanueva *et al.*, 2019). En este sentido, el modelo numérico presentado por Ruiz-Villanueva *et al.* (2014b), Iber-Wood, permite simular el transporte de madera considerando troncos individuales como cilindros que se transportan en función de la hidrodinámica y que afecta a su vez el transporte de sedimentos. Este modelo de transporte de madera está integrado en el software de simulación hidrodinámica Iber (Bladé *et al.*, 2014) y ha sido validado mediante observaciones en laboratorio y empleado para estudiar la dinámica del transporte de madera en diversos ríos (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014a,b,c; 2016a,b,c; 2017; 2020).

El proceso eruptivo del Volcán Chaitén inició el 2 de mayo del año 2008, desencadenando una serie de procesos que tuvieron una gran afectación en la zona. La caída de tefra, el colapso del domo volcánico y los flujos piroclásticos dañaron severamente los bosques de laderas, afectaron la red de drenaje, ensancharon los cauces y destruyeron la vegetación de las islas y llanuras aluviales (Major *et al.*, 2013; Pierson *et al.*, 2013; Swanson *et al.*, 2013; Ulloa *et al.*, 2015). En este contexto de profunda alteración sobre la cuenca y el corredor fluvial del Río Blanco resulta complejo analizar el comportamiento del sistema fluvial ante eventos de gran magnitud siguiendo el esquema clásico del análisis de peligrosidad, dado que todo el sistema se encuentra en una etapa de transición entre un estado de equilibrio hidrodinámico y otro (Thoms *et al.*, 2018). Esta etapa de transición puede presentar cambios geomorfológicos irreversibles sobre el sistema fluvial a distintas escalas (Phillips, 2009), siendo alguno de estos generadores de procesos en cascada que han mantenido en constante cambio la cuenca (Pierson y Major, 2014). Este quiebre en el funcionamiento hidro-morfológico del sistema fluvial desvía drásticamente su trayectoria evolutiva, por ende, el uso de estadísticas hidrológicas para obtener un valor de periodo de retorno fidedigno se ve limitado por la incertidumbre que presenta el sistema. Sumado a esto, la falta de registros hidrológicos dificulta aún más la obtención de este parámetro ya que en el Río Blanco (Chaitén) no existe una gran cantidad de datos hidrológicos, habiendo únicamente información meteorológica de las precipitaciones máximas diarias anuales de la estación DMC Chaitén (Ubicada a 1 km de la ciudad de Chaitén, a 10 msnm. y con un rango de datos de 1977-2007),

mientras no existen datos fluviométricos consistentes en el tiempo, dado que las estaciones que se han instalado en la cuenca no se han mantenido operativas por más de 5 años (Rute, 2014).

Por tanto, el enfoque de este trabajo apunta a estudiar la respuesta del sistema frente a inundaciones con diferentes condiciones de contorno (entrada) y parámetros hidráulicos abandonando el uso del periodo de retorno, dado que en el sistema se presentan diversas fuentes de incertidumbre como: a) falta de información hidrológica, b) poca claridad en las dinámicas hidromorfológicas y sedimentarias del sistema fluvial y c) un desconocimiento de la variabilidad de los procesos (composición de flujos trifásicos, interacción con estructuras, etc). En este sentido, para el desarrollo de este estudio se: 1) determinaron las condiciones iniciales que presenta el sistema Río Blanco-Chaitén, en relación con los modelos de simulación hidrodinámica (topografía, rugosidad, granulometría, madera y estructuras en el río; 2) establecieron los escenarios críticos a través de modelos de simulación hidrodinámica de flujos trifásicos (agua, sedimento y madera); 3) analizó la sensibilidad carga-respuesta de los escenarios críticos estudiados en la zona de estudio.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio corresponde al tramo del Río Blanco a su paso por la población de Chaitén, ubicado en la Provincia de Palena, Región de los Lagos. El Río Blanco divide la ciudad en dos sectores (Norte y Sur). La sección del río estudiada empieza a unos 1100 metros aguas arriba del Puente Río Blanco, hasta el fin del de las defensas fluviales (Figura 1). Chaitén se emplaza en una zona con un relieve pronunciado, siendo la continuación de la cordillera de Los Andes, la cual tiene una fuerte interacción glacial, presentándose valles y fiordos en la costa. Los puntos de mayor altitud son los volcanes el Corcovado (2300 msnm), Michinmahuida (2404 msnm), y el Chaitén (962 msnm), siendo estos últimos cercanos a la localidad de Chaitén. El clima es templado frío, con una mayor presencia de precipitaciones durante la temporada invernal (mayo a junio), la precipitación media anual a largo plazo en la

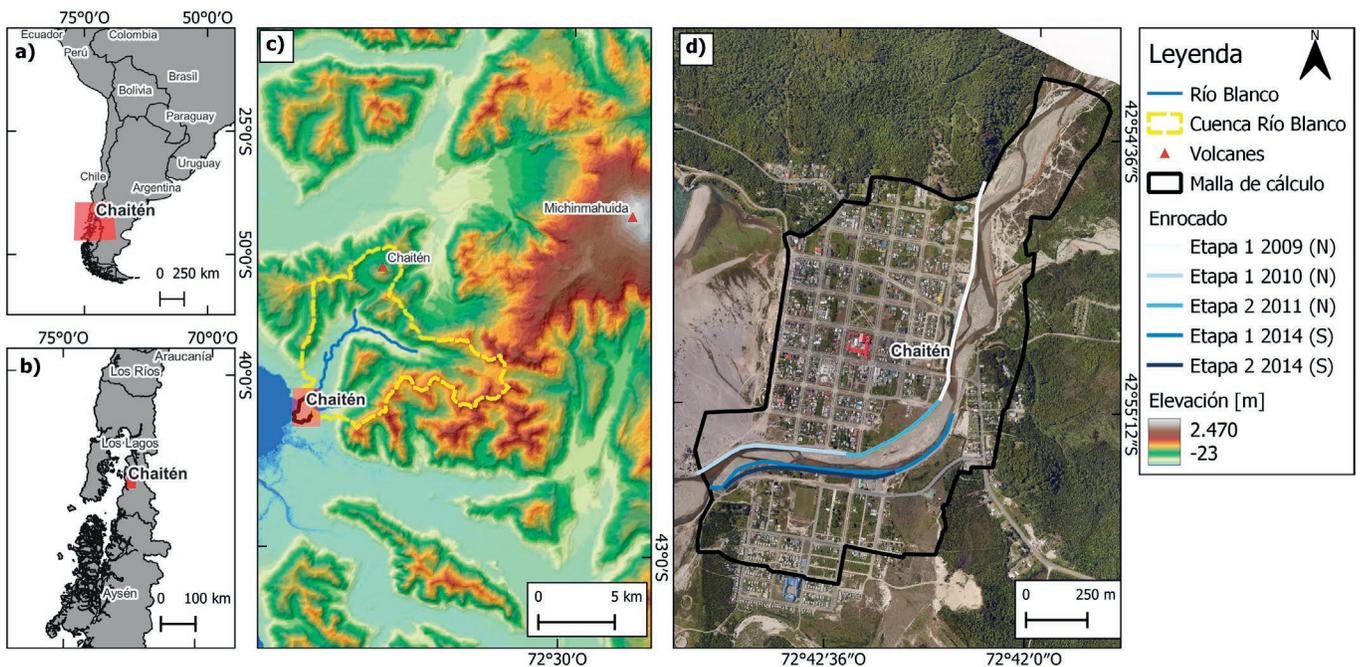


Figura 1 | Área de estudio. Los paneles a), b) y c) son referencias espaciales a distintas escalas del área de estudio. El panel d) corresponde a la malla de cálculo.

ciudad de Chaitén es de 3200 mm con una precipitación anual máxima superior a 4200 mm durante los últimos 15 años (Dirección General de Aguas, 2023).

En mayo de 2008 ocurrieron fuertes lluvias después del inicio de la erupción, que causaron inundaciones y generaron, entre otras, una rápida y masiva degradación del río Blanco debido al arrastre de sedimentos y grandes cantidades madera-LW (Umazano *et al.*, 2014; Ulloa *et al.*, 2015). Como consecuencia, el curso del río cambió produciéndose daños severos en la localidad de Chaitén, como la afectación del aeropuerto local y obligando a la evacuación de los habitantes (Major y Lara, 2013). Dado el gran impacto sobre la ciudad producido por la inundación, se construyeron defensas fluviales (un enrocado o encauzamiento) en el Río Blanco en diferentes etapas. En 2009, la Dirección de Vialidad, del Ministerio de Obras Públicas (MOP) construyó defensas fluviales protegiendo margen izquierdo del río a lo largo de una extensión longitudinal entre 1000 y 1500 m, teniendo una altura aproximada de 3 m (Rute, 2014). Se aprobaron diversas construcciones de más secciones del enrocado tanto en la ribera izquierda (noroeste) y derecha (sureste), en el 2010, 2011 y 2014, separando en dos la ciudad del Río Blanco.

Análisis hidrodinámico de escenarios

Iber es un modelo de simulación hidrodinámica que utiliza las fórmulas de Saint Venant 2D y que puede acoplar un gran número de módulos para generar distintos tipos de análisis (Bladé *et al.*, 2014). Uno de estos módulos es Iber-Wood, el cual fue utilizado para analizar el transporte de madera en flujos trifásicos (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2014b). Para realizar el análisis de escenarios de inundación sobre la ciudad de Chaitén, se definieron una serie de etapas (Figura 2): i) definición de las condiciones iniciales para el cálculo hidrodinámico; ii) Definición de condiciones de contorno y cálculo de escenarios con diferentes condiciones de entrada de caudal líquido y sólido (i.e. flujos trifásicos); iii) análisis de sensibilidad de los resultados de los escenarios hidrodinámicos.

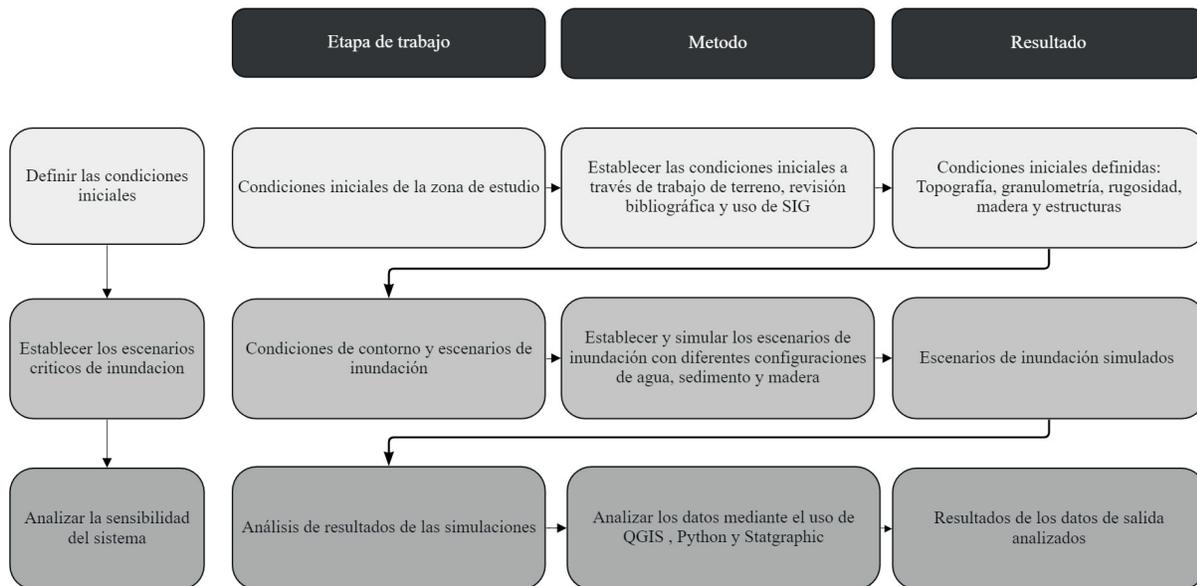


Figura 2 | Diagrama de flujo del trabajo de investigación. Las columnas se relacionan a las etapas, métodos y resultados presentes en el desarrollo de la metodología. Las filas se relacionan a los objetivos específicos de este trabajo de investigación.

Condiciones iniciales

Se realizó un vuelo con dron y levantamiento fotogramétrico complementado con el uso de GPS diferenciales, con la finalidad de generar un Modelo digital de Elevación (MDE) de alta resolución. Para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico, se realizaron vuelos con distintos ángulos de cámara, para poder generar una mejor reconstrucción en 3D (James y Robson, 2014).

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas con el dron se utilizó el software Agisoft Metashape (Li *et al.*, 2016). Se obtuvo un modelo digital de terreno de la ciudad de Chaitén, con un tamaño de pixel de 0.2 m y una extensión de 1.28 km² (ver Figura 3). El MDE final se obtuvo después de eliminar o corregir manualmente con SIG elementos como árboles, arbustos, autos, casas, y otras irregularidades.

Para la medición de la granulometría del sedimento del cauce se emplearon técnicas de procesamiento de imágenes que detectan y miden las dimensiones de los granos y cantos del sedimento (Detert y Weitbrecht, 2013). Este método permite clasificar el tamaño de los sedimentos en la zona más superficial del lecho, aunque también puede analizar esta clasificación en la subsuperficie. (Graham *et al.*, 2005b). Para esto se tomaron 11 fotografías a través del cauce con el dron Mavic Pro con el fin de que estén georeferenciadas. Con estas imágenes se midió y cuantificó la cantidad de elementos existentes en cada una de las fotografías con los softwares Digital Gravelometer (Graham, 2005a), Split y BaseGrain (Detert y Weitbrecht, 2013), con los cuales se obtuvo la curva granulométrica de cada una de las fotografías. Dadas las limitaciones de este método, se consideró únicamente la granulometría superficial. Las fotografías fueron tomadas en las barras más representativas con cercanía al flujo; no se consideraron zonas con troncos. Se obtuvieron curvas granulométricas similares, el valor del D50 que se obtuvo con BaseGrain y Split fue de 41.5 mm mientras que con Digital Gravelometer fue de 38.5 mm. Por lo tanto, se utilizó el promedio de la mediana para cada una de las curvas, obteniéndose un valor de 40.5 mm.

El coeficiente de rugosidad (n de Manning [$s \cdot m^{-1/3}$]) es uno de los parámetros más importantes a considerar para el desarrollo de las simulaciones hidrodinámicas. Para esto, se clasificó el río de acuerdo a sus características morfológicas y de usos y cubierta de suelo, y se asoció a cada unidad homogénea un valor del coeficiente de Manning (ver Figura 3, Panel A; Benson y Dalrymple (1967)). Para las zonas de la planicie de inundación se utilizó las tablas de Ven te Chow (1959). En el caso del cauce del río, es difícil proponer un valor único de rugosidad en función del tamaño de sedimento, debido a que en el río se presentan zonas con abundantes acumulaciones de troncos o zonas con presencia de bloques de gran tamaño de sedimento (>64 mm). Por ello que se consideró un factor de incertidumbre correspondiente al 30% de aumento para la rugosidad en el cauce activo del río, con lo cual se estudió la sensibilidad del modelo mismo (ver Tabla 1). Los valores de rugosidad para las otras zonas no fueron modificados.

La madera de gran tamaño es considerada como tal cuando el diámetro es mayor a 0.1 m y longitud mayor a 1 m (Gurnell *et al.*, 2000; Wohl *et al.*, 2011; Iroumé *et al.*, 2015; Wyzga *et al.*, 2015; Tonon *et al.*, 2018). En la zona de estudio, los troncos seleccionados fueron definidos mediante fotointerpretación, por lo cual se determinaron los parámetros correspondientes a cada uno de los elementos en el río; estos son considerados móviles en el modelo. Estos valores fueron: a) Diámetro y largo, relacionado a las dimensiones del tronco, b) densidad del tronco, según mediciones en terreno; c) coordenadas geográficas; d) orientación del tronco con respecto a la dirección de la corriente; e) presencia de raíz. Habiendo un total de 2095 troncos. El material orgánico de pequeñas dimensiones no fue considerado. El diámetro de los troncos identificados e incluidos en la simulación variaba entre 0.1 a 3 metros, mientras que el largo entre 0.3 y 12 metros.

Se pueden identificar 2 conjuntos de estructuras principales (Figura 3): El puente, y las viviendas. La configuración estructural del puente consiste en el tablero y dos pilares, los cuales fueron integrados como agujeros en la malla. Fueron contabilizados 715 edificios en el área de interés, sin embargo, para reducir la complejidad de la malla de cálculo solo fue consideradas como un aumento en la rugosidad de las zonas residenciales (ver Tabla 1). Por último, se definieron los parámetros básicos del proyecto de Iber, los cuales fueron: a) Tiempo de cálculo, eligiéndose un valor de 10000 s, b) se mantuvo un número de Courant estándar definido por el programa (0.45), c) se definió un área erosionable únicamente en el cauce activo, con un valor conservador de 2 m de espesor erosionable máximo, definido como una condición interna del modelo.

Tabla 1 | Coeficientes de rugosidad de las diferentes coberturas del área de cálculo.

	Coeficiente de Rugosidad de Manning [$s \cdot m^{-1/3}$]							
	Río			Planicie de inundación				
	Cauce active	Enrocado	Calles	Residencial	Bosques	Depósitos de ceniza	Praderas	Suelos desnudos
Valor inicial	0.034	0.070	0.010	0.150	0.200	0.010	0.020	0.015
+30%	0.050	-	-	-	-	-	-	-

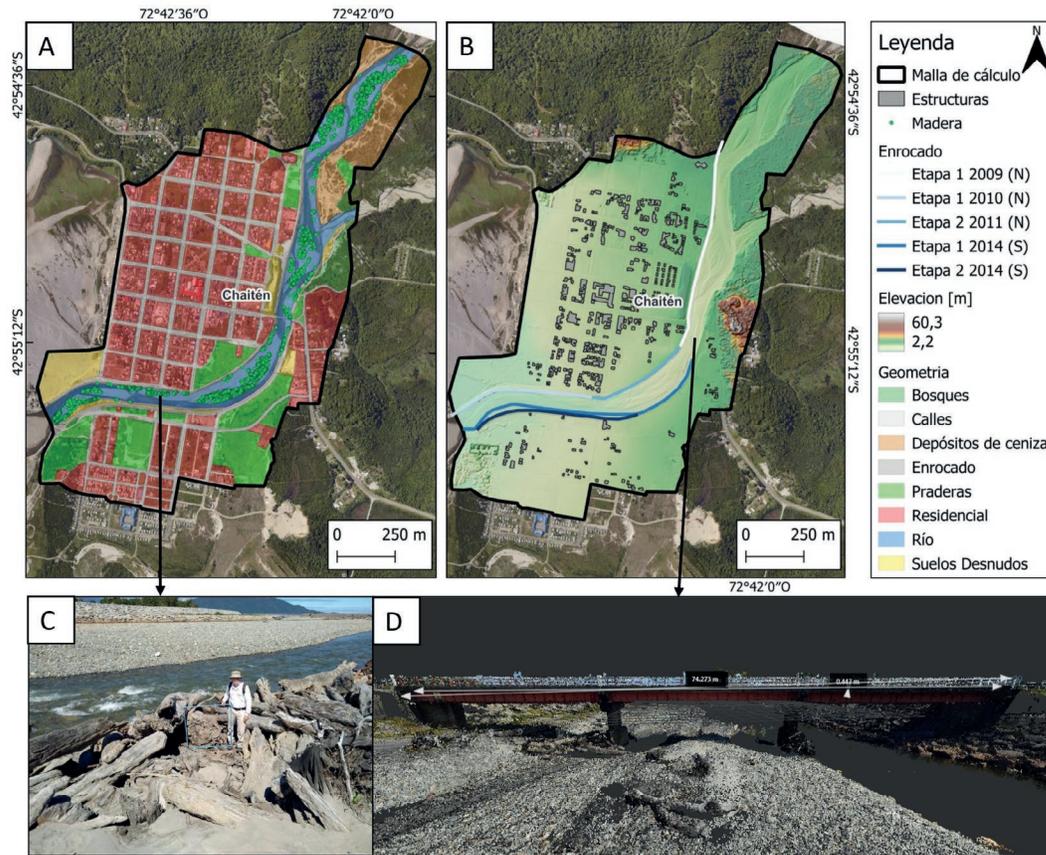


Figura 3 | Condiciones iniciales del estudio. Los paneles representan: A) la geometría del área de estudio y el posicionamiento de los troncos en todo el cauce activo; B) La topografía del área de estudio, el enrocado y las estructuras de la ciudad de Chaitén; C) Una referencia fotográfica de la madera acumulada en el río; D) Un modelo en 3D del puente y parte del enrocado.

Escenarios de inundación

Con el fin de determinar cuál es la respuesta hidrodinámica del Río Blanco y los impactos sobre las infraestructuras de la ciudad, se determinaron 3 umbrales o tipos de escenarios: baja peligrosidad, crítica y alta peligrosidad. Los escenarios de peligrosidad crítica son aquellos que determinan una inundación incipiente en alguna sección del enrocado, mientras que los escenarios de baja y alta peligrosidad representan condiciones de no desbordamiento y de gran inundación respectivamente. Para la determinación de estos escenarios se utilizó una metodología definida como análisis de escenarios de repetición progresiva la cual consiste en una repetición de escenarios de simulación hidrodinámica, con un incremento constante en el valor del caudal líquido de un escenario al subsiguiente, obteniendo una variable de respuesta en función de cada escenario, la cual puede ser área de inundación, erosión, e impacto en estructuras.

Cabe mencionar el río al estar confinado por el enrocado, solo puede afectar a la ciudad de Chaitén cuando este enrocado o, tiene alguna falla y cede, o cuando es sobrepasado. En este trabajo se consideró el enrocado como una estructura que mantiene su integridad estructural, por lo tanto, la única forma en la cual el río interactúe con la ciudad es a través de un desborde de esta defensa fluvial. Para determinar escenarios de peligrosidad de inundación se realizaron 24 simulaciones con caudales líquidos constantes entre $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ aumentando progresivamente en un valor de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Con este gran espectro de caudales se obtuvieron los umbrales mencionados en la sección anterior y se definieron los escenarios de flujos trifásicos.

Para los escenarios de repetición progresiva, fue necesario cuantificar los caudales sólidos a través de fórmulas empíricas (Chanson, 2004), para después discriminar cuales de estos resultados tienen comportamientos razonables dentro del área de estudio. Ya con los datos de granulometría establecidos, se determinó el caudal sólido que puede ser arrastrado por el Río Blanco en función del caudal líquido (Figura 4, Panel a y b), distinguiendo dos tipos de flujos sólidos, por arrastre y en suspensión. De las varias fórmulas empíricas para calcular el transporte de arrastre de fondo, se seleccionó la fórmula de Meyer-Peter y Müller (1948). En el caso del sedimento en suspensión se utilizó la fórmula empírica de Van Rijn (1984).

En cuanto a la madera, además de los troncos previamente depositados en el río, se definió un flujo de madera entrante (como condición de contorno), con un valor total equivalente a una porción de la madera presente en el río. Para ello se consideraron 3 condiciones de contorno de madera: Sin entrada, considerando solo los troncos existentes zona de cálculo; Entrada media, con una entrada del 50% de la madera depositada el río; Entrada alta, con una entrada del 200% de la madera existente (Figura 4, Panel c). La entrada de sedimentos (orgánicos e inorgánicos) se definió a los 1500 segundos, tiempo en el cual el sistema está en equilibrio, es decir, cuando el caudal entrante es igual al de salida.

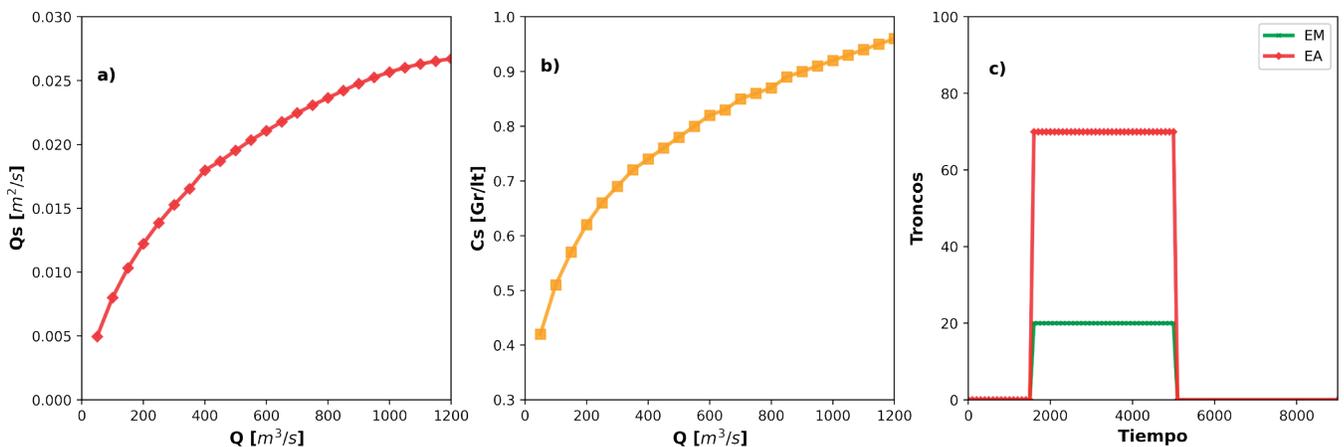


Figura 4 | Transporte de sedimento inorgánico en función del caudal líquido simulado y orgánico en función del tiempo. Siendo a) y b) el transporte de arrastre (Q_s) y en suspensión (C_s) en función del caudal líquido y c) número de troncos entrantes en los escenarios de entrada media y alta de madera en función del tiempo.

Análisis de la respuesta hidrodinámica

Para establecer los escenarios trifásicos considerando cada una de las condiciones de contorno propuestas, se configuraron en función de la magnitud (caudal líquido y sólido), rugosidad (alta y baja) y la entrada de madera (0%, 50% y 200%). Donde la variable independiente sería los caudales líquidos y sólidos, teniendo variaciones en la rugosidad y entrada de troncos (Figura 5). Por lo tanto, dentro de los escenarios iniciales de caudal líquido, solo se consideraron escenarios de alta magnitud cercanos a los umbrales críticos de inundación (desde 700 a 1000 m^3/s , cada 50 m^3/s), y se simuló con valores distintos en el coeficiente de rugosidad de Manning y en la condición de contorno de madera obteniendo un total de 42 escenarios.

Con los resultados de las modelaciones se comprobó mediante el uso del ANOVA, el cual es un método estadístico para realizar pruebas de hipótesis (St y Wold, 1989). Esto con el fin de comprobar si existen diferencias significativas entre cada uno de los escenarios en términos de: a) los escenarios con rugosidad baja y alta, b) flujos monofásicos y trifásicos y c) entre los flujos trifásicos con distintas entradas de madera.

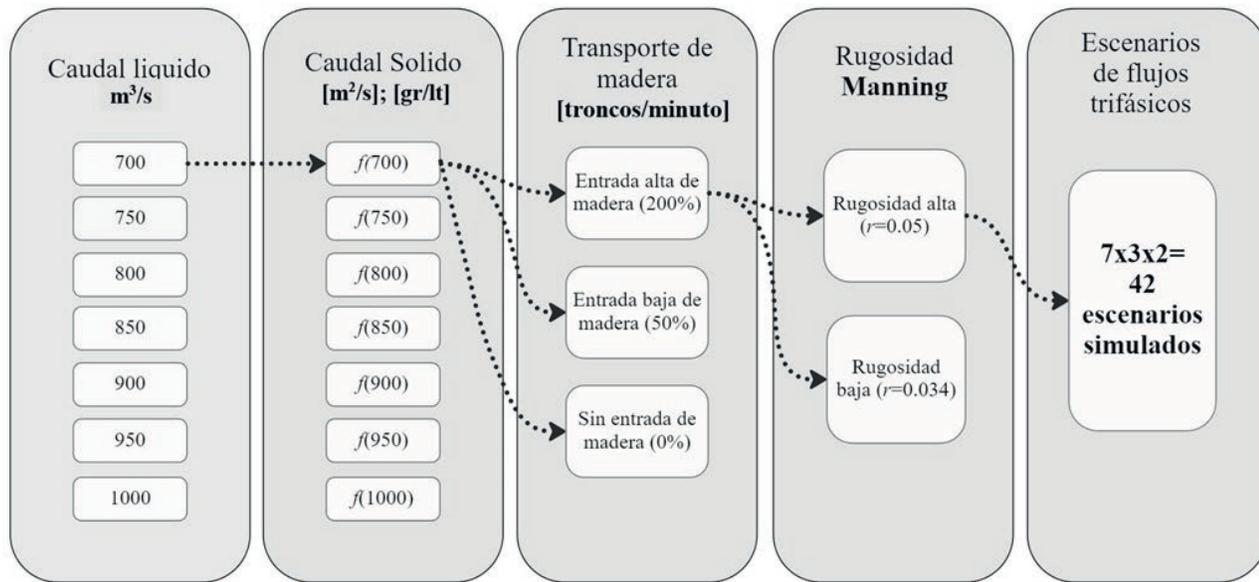


Figura 5 | Diagrama de flujo para el desarrollo de los escenarios de flujo trifásico. Cada una de las combinaciones entre caudal líquido y sólido, entrada de madera y rugosidad arroja el total de escenarios simulados.

RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones hidrodinámicas con flujos monofásicos (aguas claras) obtuvieron valores en el área de inundación sobre la ciudad notablemente diferentes en función de la rugosidad del río (Figura 6, Panel a). Los umbrales de desborde varían entre: a) 800 m³/s para las simulaciones con valores de rugosidad alta y b) 1000 m³/s para los flujos con rugosidad baja. Debajo de estos umbrales el río se comportó de una manera similar, puesto que los resultados de área de inundación fueron prácticamente iguales, lo que resalta la gran capacidad de resistencia hidráulica que presenta el enrocado. Como nivel inferior se encuentra el límite de 200 m³/s, en el cual el cauce activo del río se llena completamente. De esta forma se establece el comportamiento completo del sistema ante eventos de crecida con flujos monofásicos, y permite reducir el rango de escenarios que pueden potencialmente generar desborde sobre la ciudad.

Los escenarios con flujos trifásicos (agua, sedimento y madera) tuvieron diferencias significativas con los flujos monofásico. En este sentido, los escenarios con una rugosidad mayor tuvieron una mayor área de inundación sobre la zona de estudio y ciudad (Figura 6, Panel b y c). Esto es debido a que el cambio en el calado y su forma es generado de la manera más notoria en el puente, por lo tanto, la madera que interactúa con los pilares y tablero genera un estancamiento del flujo que propicia el desbordamiento. Sin embargo, no existieron diferencias notorias en cuanto al área de inundación entre los flujos trifásicos sin importar la cantidad de madera entrante. En otras palabras, la madera tiene una influencia sobre el área de inundación en relación a los flujos con aguas claras, pero entre los escenarios Sin entrada (SE), Entrada media (EM) y Entrada Alta (EA) de madera no existen diferencias notorias en los resultados arrojados por las simulaciones.

La distribución espacial de las zonas de desborde varía a lo largo del enrocado, es decir, existen puntos en los cuales la defensa fluvial es más propensa a verse sobrepasada. Los puntos en los cuales se presentan desbordes se concentran en la zona de la Excárcel y al sur del museo (Figura 7). En estas secciones existen alcantarillas que conectan zonas de riachuelos y pequeños humedales con el río y que se encuentran dentro de la ciudad, los cuales canalizan el desborde hacia ciertos barrios de Chaitén. Esto se puede observar en un conjunto habitacional que fue construido recientemente al noroeste del puente, en el cual en los escenarios de mayor afectación el flujo se concentra en esta zona de la ciudad, teniendo mayores calados y pudiendo generar mayores impactos. Sin embargo, la influencia de la rugosidad se hace notar entre los escenarios, dado que a mayor rugosidad mayor es el calado y el

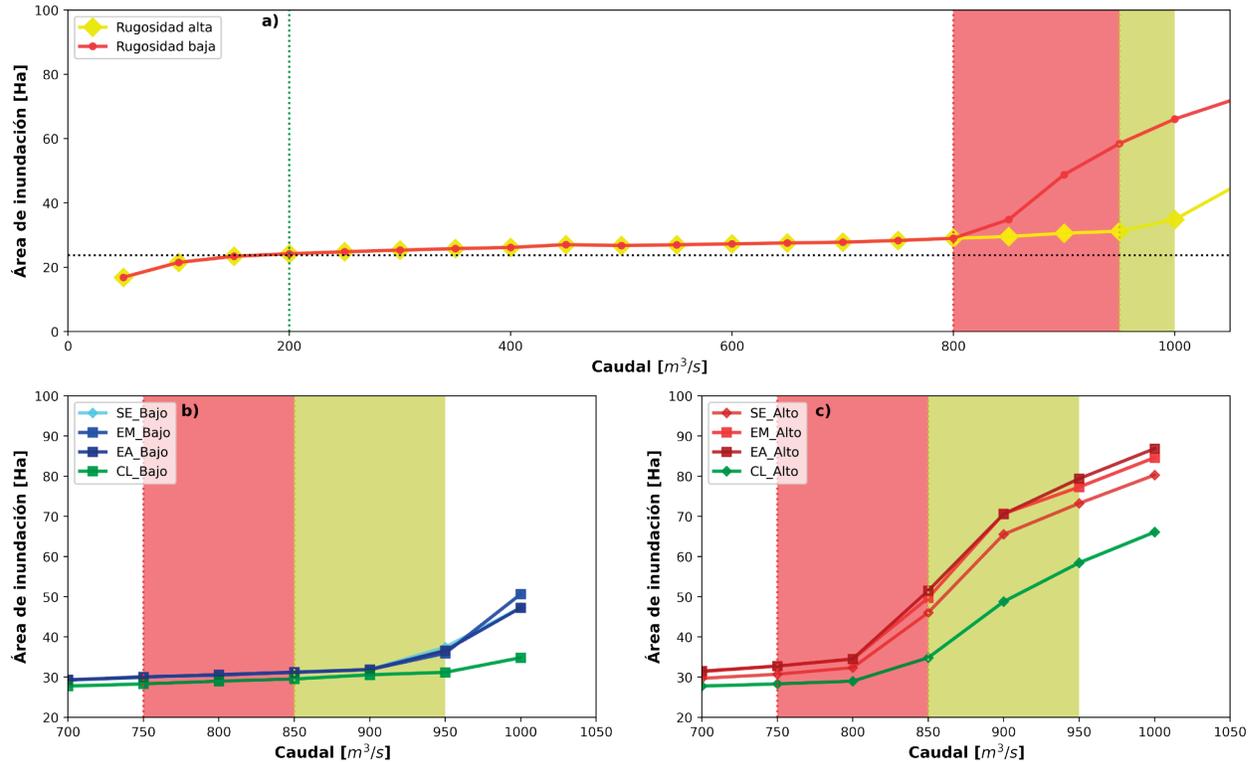


Figura 6 | Panel a) Determinación de umbrales críticos de los caudales líquidos con diferentes valores de rugosidad. Las líneas punteadas representan el límite (tanto de caudal como área inundada) entre los escenarios en los cuales no hay anegamiento sobre la planicie de inundación. Panel b) Relación entre área máxima de inundación entre flujos trifásicos y monofásicos con rugosidad baja; b) Relación entre área máxima de inundación entre flujos trifásicos y monofásicos con rugosidad alta. SE, EM, EA y CL corresponden a escenarios Sin entrada de madera, entrada media, entrada alta y caudal líquido respectivamente.

desborde es posible con caudales menores es por ello que se observan sensibles diferencias en las áreas de inundación con iguales condiciones de caudal y de entrada de madera. Las zonas de la ciudad que presentan un calado mayor se encuentran principalmente en las cercanías a los puntos de desborde, alcanzando valores máximos de hasta 1 metro de profundidad.

Los procesos de transporte de sedimento en el río fueron modificaron drásticamente el lecho del río a través de procesos de erosión y transportando grandes cantidades de material orgánico e inorgánico (Figura 8). En relación a este último, si bien existieron diferencias en la cantidad de material erosionado y transportado, en todos los escenarios considerados existió una gran erosión en distintas zonas del lecho del río. Estas zonas fueron básicamente las mismas en cada escenario salvo que se diferenciaban en relación a la cantidad de material erosionado y sedimentado. En este sentido, las zonas con mayor erosión se encontraban en la condición de entrada, de salida y en el puente. Por otro lado, las zonas con mayor sedimentación se encontraban aguas abajo de las áreas con mayor erosión, y entre ambas existió una zona de transición entre sedimentación y erosión. En las zonas cercanas a las condiciones de entrada y salida existieron procesos de sedimentación y erosión más acentuados que en el resto de las zonas del río (exceptuando al puente). En particular al puente, se observa que la erosión es la máxima considerada para el modelo (2 m), concentrándose alrededor de los pilares, siendo mayor en el pilar derecho en relación a la dirección del flujo (pila oeste) y existiendo sedimentación en el pilar izquierdo a la dirección del flujo (pila este).

Los flujos trifásicos generan impactos importantes sobre el puente, el enrocado y las viviendas en Chaitén (Figura 9). En la ciudad, el flujo interactúa con las viviendas, siendo mayor la cantidad de casas que se ven afectadas a medida que la magnitud del escenario es mayor, alcanzando un número de 600 viviendas afectadas para los flujos rugosidad alta y alrededor de 200 con rugosidad baja en los casos más extremos (Figura 9, Panel A y B). Las viviendas más expuestas al flujo son las que se encuentran cercanas a las zonas de desborde, por ende, el flujo se encuentra con una mayor velocidad y calado. Las zonas que se vieron

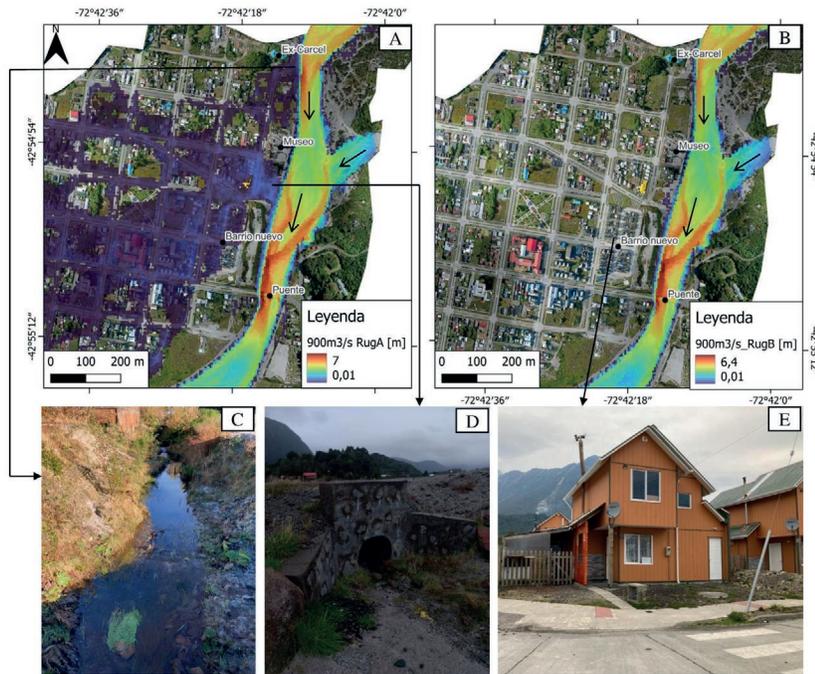


Figura 7 | Distribución espacial de las áreas de inundación. Panel A corresponde a un mapa de inundación con un escenario de $900 \text{ m}^3/\text{s}$ con alta entrada de madera y rugosidad alta. Panel B correspondo a un mapa de inundación con un escenario de $900 \text{ m}^3/\text{s}$ con alta entrada de madera y rugosidad baja. Los paneles C y D corresponden a las alcantarillas que se encuentran adyacente a la cárcel y al sur del museo que se conectan con el río. El Panel E es un ejemplo de una vivienda ubicada en el barrio nuevo que se ve afectado.

afectadas directamente fueron las ubicadas al suroeste del museo y de la ex cárcel. A medida que mayor es la distancia con estos puntos de desborde, menor es en consecuencia el calado del flujo.

En el caso del puente, la interacción estuvo más relacionada con la erosión (explicada con anterioridad) y la madera de gran tamaño. En términos generales, en cada uno de los escenarios con flujos trifásicos, gran parte de la madera que entraba en el sistema y la que se encontraba ya en este fue transportada fuera de la malla de cálculo por el flujo mismo. Una porción de la madera quedó

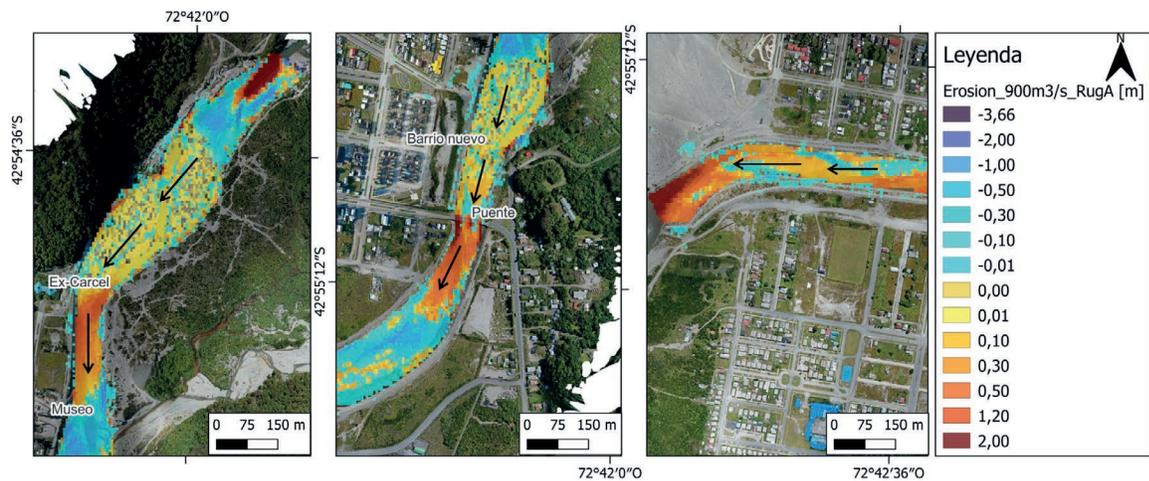


Figura 8 | Procesos de sedimentación y erosión en el río, con un escenario de referencia de $900 \text{ m}^3/\text{s}$, con rugosidad alta. Los valores positivos corresponden a la erosión y los negativos sedimentación.

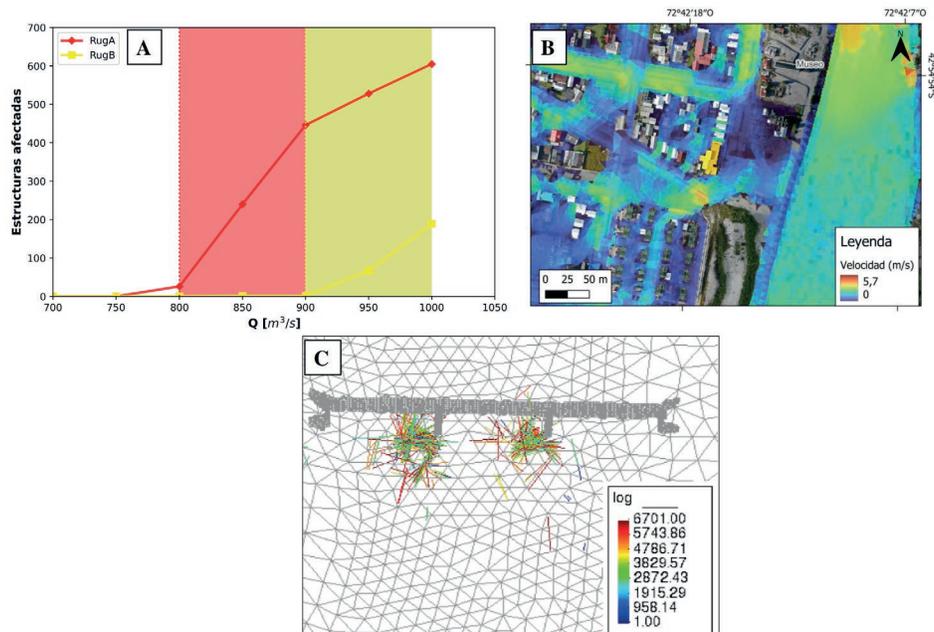


Figura 9 | Interacción flujo-estructura para los escenarios de flujos trifásicos. Panel A, relación entre los escenarios de inundación con distinta rugosidad y la cantidad de viviendas afectadas. Panel B, mapa de velocidades para un escenario de referencia de 1000 m³/s, con rugosidad alta. Panel C, interacción sedimento-estructura entre la madera de gran tamaño y los pilares del puente, la leyenda corresponde a la cantidad de troncos presentes en la malla de cálculo.

dispersa a través del lecho y el enrocado, mientras que la mayoría quedó acumulada en los pilares del puente (Figura 9, Panel C). Esta aglomeración de troncos genera un aumento importante de la rugosidad del cauce, disminuyendo la velocidad y aumentando el calado, así como también genera una disminución de la sección transversal del río, lo cual promueve el desborde del enrocado. Además, la madera en movimiento genera una gran fuerza sobre los pilares llegando desde los 5000 a 10000 N/m² en los escenarios de mayor magnitud, lo cual puede reducir drásticamente la estabilidad de la estructura.

Existieron diferencias significativas entre los escenarios estudiados (Figura 10). En específico al caso de los escenarios con rugosidad alta, el área de inundación fue significativamente mayor que en el caso de los escenarios con rugosidad baja (valores p menores a 0.05). Por otro lado, existieron diferencias significativas entre los escenarios monofásicos y los trifásicos, sin embargo, no fueron tan notorias. No obstante, la presencia de madera en el flujo demostró reducir considerablemente la magnitud del escenario para que exista un desborde sobre la ciudad, en contraste a los flujos sin transporte de madera de gran tamaño. En relación a los flujos trifásicos y su configuración en el transporte de madera como condición de entrada, no existieron diferencias significativas entre los escenarios de Entrada alta (EA), Entrada media (EM) y sin entrada de madera (SM). Es decir, la interacción que existe de la madera presente en la malla de cálculo es ya suficiente como para generar cambios importantes sobre el área de inundación o el impacto en estructuras. Esta diferencia en la significancia entre cada factor genera una importante distinción en sus resultados: la sensibilidad del modelo y del sistema en general es mayor con cambios en la rugosidad que con el tipo de flujo y su composición en cuanto a madera y sedimento. Sin embargo, esto no quiere decir que la presencia de elementos en el flujo no tenga influencia en el comportamiento de este, sino que el modelo numérico reacciona de mayor manera ante ciertas variables que en otras.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones hidrodinámicas de flujos monofásicos y trifásicos demuestran que, entre ambos tipos existen diferencias significativas en relación con el área de inundación y la peligrosidad asociada sobre la ciudad

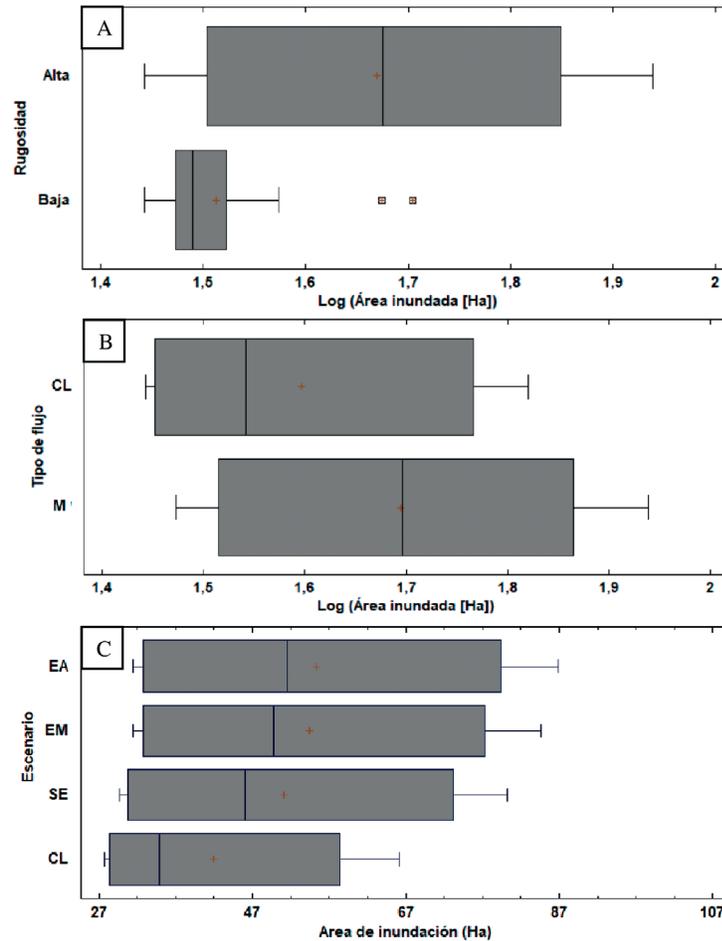


Figura 10 | Gráfico de cajas y bigotes de las áreas de inundación en función de diversos contrastes entre factores. Panel A corresponde al contraste entre escenarios con rugosidad alta y baja. Panel B, corresponde al contraste entre flujos trifásicos (M) y flujos monofásicos (CL). Panel C, corresponde al contraste entre escenarios de flujos monofásicos y flujos trifásicos con entrada alta, media y sin entrada.

de Chaitén. Por lo tanto, la premisa inicial de este trabajo se cumple, ya que los flujos con agua, sedimento y madera presentan una mayor peligrosidad sobre las zonas urbanas, requiriendo escenarios críticos de inundación de menor magnitud que en los flujos monofásicos para generar procesos de inundación sobre Chaitén iguales o mayores.

Debido a la existencia de madera, ya sea en transporte o depositada, se genera un aumento de la rugosidad, disminuyendo la velocidad del flujo y aumentando el calado lo que puede provocar desbordes sobre algunos puntos del enrocado. Esto es común en ríos con madera de gran tamaño, ya que los troncos o acumulaciones de madera interactúan constantemente con el flujo creando obstrucciones que influyen la distribución espacial de las fuerzas hidráulicas (Gippel, 1995; Hinshaw *et al.*, 2020). Esta interacción entre la madera y el flujo genera procesos de retroalimentación, los cuales producen cambios sobre la morfología del cauce y la planicie de inundación, que propician las condiciones para un almacenamiento potencial de madera de gran tamaño (Wohl *et al.*, 2018; Hinshaw *et al.*, 2020), lo cual genera una mayor resistencia al flujo, lo que disminuye la velocidad del flujo y aumenta el calado. La presencia de madera tiene una influencia importante sobre los patrones de transferencia de sedimento inorgánico, lo cual incluye acumulación, selección y lavado del sedimento, lo que genera en función de estos procesos diversas geoformas sobre el río (Gurnell *et al.*, 2002), sin embargo, la influencia de la madera sobre el transporte de sedimento no es del todo clara en los resultados de las simulaciones, debido a que las altas magnitudes de los flujos erosionaron grandes volúmenes alterando la forma del canal activo, por ende la influencia de la madera sobre los sedimentos no es clara.

En cuanto al puente, el cual, al retener troncos de madera, genera una obstrucción mayor conforme aumenta la cantidad de madera que se va acumulando, lo cual promueve los procesos de inundación aguas arriba del puente. Estos procesos son comunes en los ríos de montaña europeos, predominando la acumulación en las estructuras tales como puentes o defensas fluviales (Hinshaw *et al.*, 2020). En el caso de ríos con una infraestructura menos desarrollada, la madera se redistribuye sobre el cauce activo acumulándose principalmente en las barras (Marcus *et al.*, 2002; Hinshaw *et al.*, 2020). Esta dinámica ocurre en el río Blanco, en el cual la mayor cantidad de madera acumulada se concentra en el puente existiendo una menor acumulación de madera en las barras laterales adyacentes a las defensas fluviales. Esto se traduce en una mayor presión sobre los pilares y el tablero que genera 2 procesos consecutivos: a) Las cargas del flujo sobre el puente pueden generar que su estabilidad disminuya y; b) los procesos erosivos sobre los pilares intensificarían la inestabilidad sobre toda la estructura.

Los procesos de transporte y acumulación de madera en el río Blanco se han producido varias veces en los últimos años desde la erupción. El evento de mayor magnitud fue el año 2008, momento en el cual el sistema estaba recientemente perturbado por el proceso volcánico, existiendo zonas en las cuales las acumulaciones obstruían puentes y afectaban la infraestructura, teniendo efectos similares que los observados en el modelo (Figura 11, Panel A). Un proceso similar, pero de menor magnitud fue el ocurrido el año 2015, el cual producto de fuertes precipitaciones el caudal del río aumento considerablemente llenando casi por completo el cauce activo, transportando grandes cantidades de madera que interactuaban con el puente el Blanco (Figura 11, Panel B). Posterior a estos eventos no han existido situaciones con caudales de gran magnitud que hayan transportado grandes cantidades de madera, sin embargo, los procesos de precipitación son capaces de mover troncos de gran tamaño de igual manera, poniendo en evidencia lo dinámico que es el sistema (Figura 11, Panel C y D).

La predictibilidad de un sistema fluvial se ve afectada debido a las distintas fuentes de incertidumbre en los datos hidrológicos (McMillan *et al.*, 2018), siendo la más importante la falta de información (Moss, 1979). En el caso de los flujos de gran magnitud, su estudio, análisis espacial y gestión del riesgo se ven limitado por la insuficiente información hidrológica (Viero *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2019). Existen en el mundo una enorme cantidad de cuencas sin ningún tipo de medición como precipitación o caudal (Li *et al.*, 2019) y, si las hay son recientes y con poca información, dentro de las cuales se encuentra el río Blanco (Chaitén). Sin embargo, existen otras fuentes menos notorias que de igual manera tienen influencias sobre el sistema y por sobre todo en su estudio



Figura 11 | Procesos de crecida de ríos afectados por el Volcán Chaitén. Panel A corresponde a un evento posterior a la erupción del 2008 en el Puente Gral. Manuel Feliu, ubicado en el Estero Gonzalo, en la Comuna de Chaiten (Extraído de <http://www.latejuela.cl/blog/cortes-en-la-carretera-austral-se-registran-en-las-inmediaciones-del-volcan-chaiten/>). Panel B, corresponde a un evento de inundación ocurrido el 2015 en la ciudad de Chaitén, en el cual el material leñoso se acumuló en el puente El Blanco (Foto extraída de Tonon *et al.*, 2017). Panel C y D corresponde a la comparación entre condiciones normales y de crecida en el río Blanco. La flecha roja resalta el transporte de leña de gran tamaño en una crecida de recurrencia anual.

y análisis: i) un inestable comportamiento reológico y concentración de la mezcla líquido-sólido de los flujos de escombros, ii) poca claridad en las dinámicas de carga de sedimento del sistema (duración, intensidad, entre otros), iii) incertidumbre en los mecanismos de respuesta del sistema (obstrucciones localizadas, tipologías de río inestables, entre otros), iv) poca confianza en la funcionalidad del sistema de protección y a la fiabilidad de la mitigación (inestabilidad de defensas fluviales, alcantarillados, entre otros), v) las incertidumbres relativas a los cambios morfológicos que inducen los procesos de peligro o amplifican su disposición (erosión en canales aluviales o en abanicos aluviales, y los cambios de la trayectoria del flujo, entre otros (Mazzorana et al., 2009). Para entender correctamente este último punto, es necesario recalcar que en el Río Blanco existió una gran perturbación volcánica que cambio completamente las dinámicas hidro-morfológicas del sistema fluvial. Y no solo ello, sino que también genero procesos en cascada por sobre toda la cuenca, tales como perdida de cobertura de bosques, remociones en masa, entre otros (Korup et al., 2019). Por lo tanto, todo el sistema fluvial cambio considerablemente desde la perturbación inicial, por lo cual la respuesta que tendría ante ciertos eventos de precipitación, inundación, flujos cargados con sedimentos es diferentes a la condición anterior y por, sobre todo, no existe claridad de cuáles son los patrones existentes.

En el desarrollo de escenarios, y en este caso relacionado a procesos de inundación, es importante la búsqueda de los razonamientos como *¿Qué podría ser cierto?*, o también *¿Qué no es cierto y podría serlo?* Esta forma de razonar ciertos eventos que no ocurren, pero si pueden ocurrir bajo ciertas condiciones se considera en filosofía como una modalidad contrafáctica o *counterfactual modality* (Starr, 2019). Esta modalidad apunta a resolver una serie de preguntas y razonamientos de los cuales nos centraremos en los epistémicos. Es decir, *¿Cómo nuestra experiencia en nuestro mundo actual, con sus patrones y dinámicas, puede justificar condiciones o situaciones improbables sobre este?* (Starr, 2019). En otras palabras y centrándonos en la temática que estamos trabajando, *¿Cómo podemos establecer escenarios de inundación fidedignos si el sistema estudiado esta recientemente alterado?* Esta interrogante sugiere un importante cuestionamiento a la forma clásica de abordar los eventos de inundación. En estricto rigor, los diferentes estudios realizados en la zona, tanto para la construcción de defensas fluviales o para la definición de áreas de afectación, lo que se ha realizado fue básicamente un símil del concepto de inundación de diseño (*Design Flood* o *Synthetic Flood*), la cual representa la máxima inundación que una estructura hidráulica puede soportar y que fue establecida como marco general para la gestión del riesgo de inundación en los países de la Unión Europea (Drobot et al., 2021). Por lo tanto, *¿Cómo se define una inundación de diseño en un sistema en el cual no existe información hidrológica consistente y que ha sido alterado a tal punto que no se conocen como las variables de respuesta reaccionan ante eventos de inundación de gran magnitud?*

El sistema fluvial cambia a través del tiempo y las perturbaciones (en este caso por volcanismo), alteran las variables de respuesta del sistema temporalmente para posteriormente volver a un nuevo estado de equilibrio. En otras palabras, los estados de equilibrio sugieren que las variables de respuesta tienen un comportamiento similar en el tiempo y pueden ser predichas (Figura 12, Panel a y c), mientras que los estados alterados o en desequilibrio, pueden arrojar valores en sus variables de respuestas impredecibles e inciertos (Figura 12, Panel b). En este momento, el río y toda la cuenca está en la fase de transición entre un estado de equilibrio y otro, dado que aún se observan los efectos sobre el corredor fluvial, en relación a los procesos de erosión y sedimentación y el transporte de material leñoso que siguen siendo importantes. Además de esto, se han observado procesos en cascada sobre toda la cuenca, como remociones en masa de gran magnitud en diferentes puntos de esta, los cuales tienen efectos sobre el corredor fluvial mucho tiempo después de la perturbación volcánica inicial. Esto puede generar cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos de precipitación importantes, así como también crea una fuente de incertidumbre en la parametrización hidráulica de los modelos numéricos debido al constante cambio del corredor fluvial. Otro punto de no menor importancia es la influencia antrópica, la cual, a través de las construcciones de defensas fluviales, remoción de material leñoso y modificación del cauce ha generado cambios importantes que se pueden expresar sobre las variables de respuesta del sistema (caudal, velocidad, entre otros).

En los modelos de simulación hidrodinámica, conforme mayor es la cantidad de variables utilizadas, mayor inestabilidad presentó el modelo. Este tipo de programas son una representación de la realidad, por lo cual es posible que existan distorsiones en los resultados obtenidos, más aún cuando se consideran escenarios atípicos con magnitudes catastróficas. Esto no solo ocurre con los datos de salida que se extrae de la simulación, sino que también ocurre con el modelo mismo, ya que en este trabajo no fue lo mismo trabajar con flujos monofásicos que con flujos trifásicos. Cuando se analiza el paisaje, sus componentes y su comportamiento espacial y temporal, sin importar cual sea el sistema (río, costa, lagos, etc.), a medida que aumenta la información que se utiliza para su análisis, aumenta a su vez y de manera considerable la incertidumbre en la predicción de esta zona de estudio (Phillips, 2014). Por lo tanto, es necesario tener en consideración que los resultados de este tipo de modelos no solo contienen la

incertidumbre proveniente de la gran cantidad de variables que se consideran (topografía, granulometría, rugosidad, entre otros), sino también que dichas variables están en constante cambio dado que el sistema no está en equilibrio. La naturaleza dinámica de las amenazas emergentes requiere cada vez más técnicas y abordajes analíticos para estudiar y tratar eventos de baja probabilidad y gran magnitud (Taleb, 2007; Smith y Fischbacher, 2009). Esto sugiere un gran desafío a la hora de definir las variables a considerar para generar escenarios, interpretar los resultados y desarrollar una gestión adecuada del riesgo sobre asentamientos humanos afectados o potencialmente afectados por procesos de inundaciones de gran magnitud.

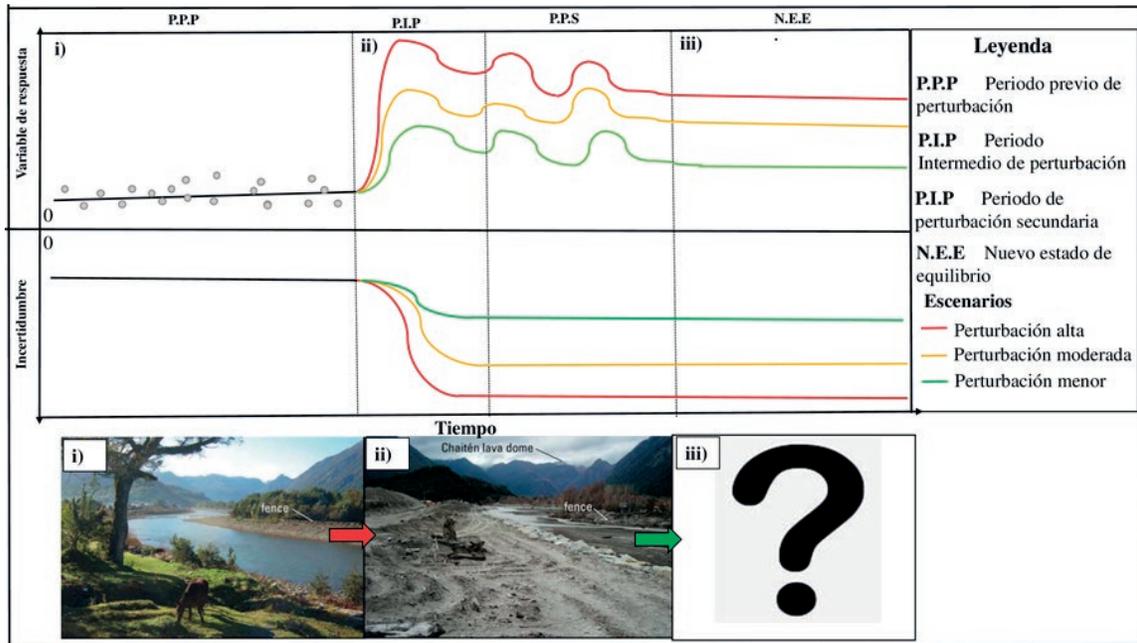


Figura 12 | Cambio de las variables de respuesta (caudal, área de inundación, etc.) de un sistema fluvial en función del tiempo debido a perturbaciones sobre este; los puntos grises corresponden a eventos normales de la variable de respuesta. Los paneles i, ii y iii corresponderían a las fases sobre el sistema estudiado, es decir, i) previo a la perturbación, ii) recientemente afectado y iii) ya subsanado de forma que se haya vuelto a un nuevo estado de equilibrio, respectivamente. Imágenes i) y ii) extraídas de Major y Lara (2013).

CONCLUSIONES

El sistema Río Blanco-Chaitén es sin duda un ambiente altamente perturbado, caracterizado por una elevada incertidumbre que dificulta severamente la definición de escenarios de inundación, y por tanto la gestión del riesgo sobre la ciudad. En este sentido, método de repetición progresiva utilizado en este trabajo para estudiar las dinámicas fluviales y su peligrosidad asociada, ha sido una potente herramienta metodológica alternativa para vislumbrar de una manera holística como el sistema fluvial del Río Blanco y la ciudad de Chaitén pueden reaccionar ante ciertas condiciones de caudal líquido y sólido.

Los resultados de este método demuestran que la sensibilidad de la ciudad aumenta conforme la magnitud del flujo es mayor, por lo tanto, crecidas con caudales mayores son más propensas a desbordar el enrocado e inundar la ciudad. En este sentido, es importante mencionar que los caudales utilizados fueron de gran magnitud (desde 700 m³/s a 1000 m³/s), dado que el enfoque de este trabajo era buscar los escenarios críticos. Sin embargo, el rol del material sólido en esta sensibilidad es importante (principalmente la madera), ya que aumenta la rugosidad del cauce e interactúa con las estructuras presentes en el río de manera que los flujos trifásicos (agua, sedimento y madera) necesitan una magnitud menor para generar una inundación sobre la ciudad. Esto demuestra la gran importancia que tiene el sedimento sólido sobre las dinámicas fluviales de gran magnitud y también hace énfasis en la relevancia de la gestión de los ríos para disminuir el riesgo de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por ANID/CONICYT con el Proyecto FONDECYT REGULAR - Folio 1200091 - “Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in Southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT)” del Investigador Responsable Bruno Mazzorana.

REFERENCIAS

- Basso-Báez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bahamondes, D., Ruiz-Villanueva, V., Sanhueza, D.,... Picco, L. 2020. Unravelling the impacts to the built environment caused by floods in a river heavily perturbed by volcanic eruptions. *Journal of South American Earth Sciences*, 102, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102655>
- Benson, M.A., Dalrymple, T. 1967. General field and office procedures for indirect discharge measurements (No. 03-A1). *US Govt. Print. Off.*
- Bierman, P.R., Montgomery, D.R., Massey, C.A. 2013. Key Concepts in Geomorphology-NSF supports community-based creation of a new style of textbook. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2013, pp. ED23E-01).
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E.,... Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Corestein, G. 2016a. Challenges of numerical modelling of flow, sediment, and wood in rivers. In *Proceedings of the third International Conference of Wood in World Rivers*.
- Braudrick, C.A., Grant, G.E. 2001. Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology*, 41(4), 263-283. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00058-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00058-7)
- Braudrick, C.A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. 1997. Dynamics of wood transport in streams: a flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Group*, 22(7), 669-683. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199707\)22:7<669::AID-ESP740>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199707)22:7<669::AID-ESP740>3.0.CO;2-L)
- Chanson, H. 2004. *Hydraulics of open channel flow*. Elsevier.
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill civil engineering series.
- Comiti, F., Lucía, A., Rickenmann, D. 2016. Large wood recruitment and transport during large floods: a review. *Geomorphology*, 269, 23-39. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.016>
- Detert, M., Weitbrecht, V. 2013. User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in science and research*, 1789-1795.
- Dirección general de Aguas (DGA), Ministerio de Obras Públicas. 2023. *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea*. URL: <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Drobot, R., Draghia, A.F., Ciuiu, D., Trandafir, R. 2021. Design floods considering the epistemic uncertainty. *Water*, 13(11), 1601. <https://doi.org/10.3390/w13111601>
- Fuchs, S., Karagiorgos, K., Kitikidou, K., Maris, F., Paparrizos, S., Thaler, T. 2017. Flood risk perception and adaptation capacity: A contribution to the socio-hydrology debate. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 3183-3198. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3183-2017>
- Gilbert, G.K., Murphy, E.C. 1914. The transportation of debris by running water (No. 86). *US Government Printing Office*. <https://doi.org/10.3133/pp86>

- Gippel, C.J. 1995. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering*, 121(5), 388-395. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:5\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:5(388))
- Graham, D.J., Reid, I., Rice, S.P. 2005a. Automated sizing of coarse-grained sediments: image-processing procedures. *Mathematical geology*, 37(1), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s11004-005-8745-x>
- Graham, D.J., Rice, S.P., Reid, I. 2005b. A transferable method for the automated grain sizing of river gravels. *Water Resources Research*, 41(7). <https://doi.org/10.1029/2004WR003868>
- Gurnell, A.M., Petts, G.E., Harris, N., Ward, J.V., Tockner, K., Edwards, P.J., Kollmann, J. 2000. Large wood retention in river channels: the case of the Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(3), 255-275. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200003\)25:3<255::AID-ESP56>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200003)25:3<255::AID-ESP56>3.0.CO;2-H)
- Gurnell, A.M., Piégay, H., Swanson, F.J., Gregory, S.V. 2002. Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601-619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- Hinshaw, S., Wohl, E., Davis, D. 2020. The effects of longitudinal variations in valley geometry and wood load on flood response. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(12), 2927-2939. <https://doi.org/10.1002/esp.4940>
- Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Ulloa, H., Ardiles, M.P. 2015. Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels. *Geomorphology*, 228, 681-693. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.025>
- James, Mike R., tuart Robson. 2014. "Mitigating Systematic Error in Topographic Models Derived from UAV and Ground-Based Image Networks." *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), 1413-1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>
- Korup, O., Seidemann, J., Mohr, C.H. 2019. Increased landslide activity on forested hillslopes following two recent volcanic eruptions in Chile. *Nature Geoscience*, 12(4), 284-289. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0315-9>
- Lancaster, S.T., Hayes, S.K., Grant, G.E. 2003. Effects of wood on debris flow runout in small mountain watersheds. *Water Resources Research*, 39(6). <https://doi.org/10.1029/2001WR001227>
- Li, Xiu quan, Zhu an Chen, Li ting Zhang, and Dan Jia. 2016. Construction and Accuracy Test of a 3D Model of Non-Metric Camera Images Using Agisoft PhotoScan. *Procedia Environmental Sciences* 36:184-190. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.09.031>
- Li, Y., Zhang, Q., Cai, Y., Tan, Z., Wu, H., Liu, X., Yao, J. 2019. Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: Insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China). *Science of the Total Environment*, 660, 245-259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.015>
- Lisle, T.E. 1995. Particle size variations between bed load and bed material in natural gravel bed channels. *Water Resources Research*, 31(4), 1107-1118. <https://doi.org/10.1029/94WR02526>
- Major, J.J., Lara, L.E. 2013. Overview of Chaitén Volcano, Chile, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40(2), 196-215. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a01>
- Major, J.J., Bertin, D., Pierson, T.C., Amigo, Á., Iroumé, A., Ulloa, H., Castro, J. 2016. Extraordinary sediment delivery and rapid geomorphic response following the 2008–2009 eruption of Chaitén Volcano, Chile. *Water Resources Research*, 52(7), 5075-5094. <https://doi.org/10.1002/2015WR018250>
- Major, J.J., Pierson, T.C., Hoblitt, R.P., Moreno, H. 2013. Pyroclastic density currents associated with the 2008-2009 eruption of Chaitén Volcano (Chile): Forest disturbances, deposits, and dynamics. *Andean Geology*, 40(2), 324-358. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a09>
- Marcus, W.A., Marston, R.A., Colvard Jr, C.R., Gray, R.D. 2002. Mapping the spatial and temporal distributions of woody debris in streams of the Greater Yellowstone Ecosystem, USA. *Geomorphology*, 44(3-4), 323-335. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00181-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00181-7)
- Martini, L., Picco, L., Iroumé, A., Cavalli, M. 2019. Sediment connectivity changes in an Andean catchment affected by volcanic eruption. *Science of the Total Environment*, 692, 1209-1222. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.303>

- Mazzorana, B., Hübl, J., Zischg, A., Largiader, A. 2011. Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Natural Hazards*, 56(2), 425-449. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9492-y>
- Mazzorana, B., Ruiz-Villanueva, V., Marchi, L., Cavalli, M., Gems, B., Gschnitzer, T.,... Valdebenito, G. 2018. Assessing and mitigating large wood-related hazards in mountain streams: recent approaches. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 207-222. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12316>
- Mazzorana, B., Picco, L., Rainato, R., Iroumé, A., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, C.,... Melnick, D. 2019. Cascading processes in a changing environment: disturbances on fluvial ecosystems in Chile and implications for hazard and risk management. *Science of the Total Environment*, 655, 1089-1103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.217>
- McMillan, H.K., Westerberg, I.K., Krueger, T. 2018. Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1319. <https://doi.org/10.1002/wat2.1319>
- Meyer-Peter E, Muller R 1948. Formulas for Bed-Load Transport. *IAHSR, Stockholm*, pp 39–64. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Moss, M.E. 1979. Some basic considerations in the design of hydrologic data networks. *Water Resources Research*, 15(6), 1673-1676. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01673>
- Phillips, J.D. 2009. Landscape evolution space and the relative importance of geomorphic processes and controls. *Geomorphology*, 109(3-4), 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.007>
- Phillips, J.D. 2014. State transitions in geomorphic responses to environmental change. *Geomorphology*, 204, 208-216. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.08.005>
- Pierson, T.C., Major, J.J. 2014. Hydrogeomorphic effects of explosive volcanic eruptions on drainage basins. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 469-507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054913>
- Pierson, T.C., Major, J.J., Amigo, A., Moreno, H. 2013. Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008–2009 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 75(5), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4>
- Ravazzolo, D., Mao, L., Mazzorana, B., Ruiz-Villanueva, V. 2017. Brief communication: The curious case of the large wood-laden flow event in the Pocuro stream (Chile). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(11), 2053-2058. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2053-2017>
- Rijn, L.C.V. 1984. Sediment transport, part II: suspended load transport. *Journal of hydraulic engineering*, 110(11), 1613-1641. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:11\(1613\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:11(1613))
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Eguibar, M.A., Pardo-Igúzquiza, E. 2013. Reconstruction of a flash flood with large wood transport and its influence on hazard patterns in an ungauged mountain basin. *Hydrological Processes*, 27(24), 3424-3437. <https://doi.org/10.1002/hyp.9433>
- Ruiz Villanueva, V., Bladé Castellet, E., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M., Sánchez-Juny, M. 2014a. Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. *Earth surface processes and landforms*, 39(4), 438-449. <https://doi.org/10.1002/esp.3456>
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Martí-Cardona, B., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M. 2014b. Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics*, 16(5), 1077–1096. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.026>
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Bladé, E. 2014c. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural hazards*, 74(2), 967-987. DOI 10.1007/s11069-014-1222-4
- Ruiz-Villanueva, V., Allen, S., Arora, M., Goel, N.K., Stoffel, M. 2017. Recent catastrophic landslide lake outburst floods in the Himalayan mountain range. *Progress in Physical Geography*, 41(1), 3-28. <https://doi.org/10.1177/0309133316658614>
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L.,... Wohl, E. 2019. Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(9), 1694-1709. <https://doi.org/10.1002/esp.4603>

- Ruiz-Villanueva, V., Gamberini, C., Bladé, E., Stoffel, M., Bertoldi, W. 2020. Numerical modeling of instream wood transport, deposition, and accumulation in braided morphologies under unsteady conditions: Sensitivity and high-resolution quantitative model validation. *Water Resources Research*, 56(7), e2019WR026221. <https://doi.org/10.1029/2019WR026221>
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Zawiejska, J., Hajdukiewicz, M., Stoffel, M. 2016a. Factors controlling large-wood transport in a mountain river. *Geomorphology*, 272, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.004>
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.M., Marston, R.A., Stoffel, M. 2016b. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652. <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gaertner, V., Perret, F., Stoffel, M. 2016c. Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers. *Catena*, 140, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.001>
- Rute, C. 2014. *Diseño y estudio de defensas fluviales en la ribera sur del río Blanco en Chaitén*. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Smith, D., Fischbacher, M. 2009. The changing nature of risk and risk management: The challenge of borders, uncertainty and resilience. *Risk management*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.1057/rm.2009.1>
- St, L., Wold, S. 1989. Analysis of variance (ANOVA). *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, 6(4), 259-272. [https://doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80095-4](https://doi.org/10.1016/0169-7439(89)80095-4)
- Starr, W. 2019. "Counterfactuals", The Stanford Encyclopedia of Philosophy 2021, Edward N. Zalta (ed.), <https://plato.stanford.edu/archives/sum2021/entries/counterfactuals>
- Steeb, N., Rickenmann, D., Badoux, A., Rickli, C., Waldner, P. 2017. Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005. *Geomorphology*, 279, 112-127. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.10.011>
- Swanson, F.J., Jones, J.A., Crisafulli, C.M., Lara, A. 2013. Effects of volcanic and hydrologic processes on forest vegetation: Chaitén Volcano, Chile. *Andean Geology*, 40(2), 359-391. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a10>
- Taleb, N.N. 2007. Black swans and the domains of statistics. *The american statistician*, 61(3), 198-200. <https://doi.org/10.1198/000313007X219996>
- Thoms, M.C., Piégay, H., Parsons, M. 2018. What do you mean, 'resilient geomorphic systems'?. *Geomorphology*, 305, 8-19. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.003>
- Tonon, A., Iroumé, A., Picco, L., Oss-Cazzador, D., Lenzi, M.A. 2017. Temporal variations of large wood abundance and mobility in the Blanco River affected by the Chaitén volcanic eruption, southern Chile. *Catena*, 156, 149-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.025>
- Tonon, A., Picco, L., Rainato, R. 2018. Test of methodology for developing a large wood budget: A 1-year example from a regulated gravel bed river following ordinary floods. *Catena*, 165, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.035>
- Umazano, A.M., Melchor, R.N., Bedatou, E., Bellosi, E.S., Krause, J.M. 2014. Fluvial response to sudden input of pyroclastic sediments during the 2008–2009 eruption of the Chaitén Volcano (Chile): The role of logjams. *Journal of South American Earth Sciences*, 54, 140-157. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.04.007>
- Viero, D.P., Peruzzo, P., Carniello, L., Defina, A. 2014. Integrated mathematical modeling of hydrological and hydrodynamic response to rainfall events in rural lowland catchments. *Water Resources Research*, 50(7), 5941-5957. <https://doi.org/10.1002/2013WR014293>
- Wohl, E., Polvi, L.E., Cadol, D. 2011. Wood distribution along streams draining old-growth floodplain forests in Congaree National Park, South Carolina, USA. *Geomorphology*, 126(1-2), 108-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.035>

Wohl, E., Scott, D.N., Lininger, K.B. 2018. Spatial distribution of channel and floodplain large wood in forested river corridors of the Northern Rockies. *Water Resources Research*, 54(10), 7879-7892. <https://doi.org/10.1029/2018WR022750>

Wyźga, B., Zawiejska, J., Mikuś, P., Kaczka, R.J. 2015. Contrasting patterns of wood storage in mountain watercourses narrower and wider than the height of riparian trees. *Geomorphology*, 228, 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.014>