

Una ruta metodológica para determinar escenarios de interacción entre procesos fluviales y el entorno construido residencial en Patagonia Occidental

A methodological roadmap to determine interaction scenarios between fluvial processes and the residential built environment in Western Patagonia

BRUNO MAZZORANA¹  0000-0003-1218-4495

JUSTINNE RYBERTT GOLDAMMER²  0000-0002-6564-2288

YERELIN CÁRCAMO PALMA²  0009-0003-1669-6348

ANAÍ GREZ SINUÉS²  0009-0000-0386-2624

IVAN JAVIER ROJAS CASTILLO³  0000-0002-4144-9803

DIEGO BAHAMONDES ROSAS²  0009-0009-2349-2494

ROBERTO HOCES FREIRE²  0009-0001-7372-6158

¹Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

²Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

³Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

Resumen

Vislumbrar cuales podrían ser escenarios plausibles de interacción entre procesos fluviales y el entorno construido residencial es una tarea compleja. Esta consiste en determinar y cuantificar la propagación de los flujos en los cauces y en las planicies de inundación, además, hay que precisar el modo en que estos flujos podrían afectar a los distintos elementos del entorno construido conllevando daños económicos. En este trabajo se propone una ruta metodológica para identificar y estructurar escenarios de interacción entre procesos fluviales y el entorno construido con énfasis en los sistemas fluviales perturbados por erupciones volcánicas en la Patagonia Chilena. Conscientes de que la elaboración de estos escenarios siempre conlleva un alto grado de incertidumbre y que la dinámica de los procesos fluviales en cuencas afectadas por peligros naturales puede reservar más de una sorpresa, argumenta-

Fechas • Dates

Recibido: 2023.12.17
Aceptado: 2025.05.23
Publicado: 2025.xx.xx

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

M Bruno Mazzorana
bruno.mazzorana@uach.cl

mos que la estructuración de estos escenarios concadenando modelos de proceso, impacto y respuesta, permite corregir ágilmente las hipótesis y conjeturas iniciales que no resultasen avaladas por las evidencias e integrar los nuevos conocimientos adquiridos. Esto representa una condición imprescindible para la toma de decisiones en materia de mitigación de riesgos y para aumentar la resiliencia de las estructuras expuestas a los impactos de los procesos fluviales.

Palabras clave: gestión del riesgo de inundaciones; peligros naturales; cuencas de montaña; modelo de impacto y respuesta; procesos fluviales

Abstract

It is a complex task to identify plausible scenarios of interaction between fluvial processes and the residential built environment. It entails of determining and quantifying the propagation of flows in the river channels and flood plains, and the way in which these flows could affect the different elements of the built environment leading to economic damage. This paper proposes a methodological roadmap to identify and structure scenarios of interaction between fluvial processes and the built environment with emphasis on fluvial systems disturbed by volcanic eruptions in Chilean Patagonia. Aware that the elaboration of these scenarios always involves a high degree of uncertainty and that the dynamics of fluvial processes in basins affected by natural hazards may have more than one surprise in store, we argue that the structuring of these scenarios by linking process, impact and response models allows to quickly correct the initial hypotheses and conjectures that are not supported by the evidence and to integrate the new knowledge acquired. This represents an essential condition for decision-making in terms of risk mitigation and for increasing the resilience of structures exposed to the impacts of fluvial processes.

Keywords: flood risk management; natural hazards; mountain basins; response model; fluvial processes

1. Introducción

Actualmente, las inundaciones son uno de los mayores peligros naturales a escala global (Pesaresi et al., 2017) generando grandes impactos socioeconómicos y ambientales (De Groeve et al., 2015). En la primera década de este siglo, producto de grandes inundaciones se han registrado pérdidas de US\$24 billones alrededor del mundo junto con miles de muertes por año (Kundzewicz et al., 2014). En este sentido, la influencia antrópica en el cambio climático ha servido como propulsor en el aumento de la frecuencia y magnitud de las inundaciones en los corredores fluviales (Dankers & Feyen, 2008; Hirabayashi et al., 2013; Früh-Müller et al., 2015; Milanese et al., 2018). Por otro lado, el riesgo de inundación se ha visto incrementado por el tipo de uso de suelo, esto debido a que las llanuras de inundación han sido utilizadas como áreas de expansión de asentamientos humanos (Pesaresi et al., 2017; Mazzoleni et al., 2021).

Para mitigar estos riesgos, es necesario analizar la susceptibilidad del territorio y planificar racionalmente su uso, empleando herramientas eficaces para la gestión del riesgo (Ran & Nevodic-Budic, 2016). En muchos países se han adoptado estrategias de prevención y mitigación como sistemas de alerta temprana, soluciones ingenieriles en los cauces fluviales para amortiguar la intensidad de los procesos (caudales líquidos y sólidos) y reducir los impactos generados (Mazzorana et al., 2012a; Alfieri et al., 2018; Fuchs et al., 2019a). Además, se han implementado obras de protección local asociadas al entorno construido (Holub et al., 2012) con el fin de disminuir la vulnerabilidad de las viviendas y aumentar la resiliencia de las construcciones (Attems et al., 2020).

En este ámbito, para cuantificar las condiciones de carga para un edificio específico, es necesario analizar, en primera instancia, el tipo de amenaza y su modo de acción, lo cual puede realizarse mediante modelos de proceso (Suda & Rudolf-Miklau, 2012). En esta fase se identifican y cuantifican las variables que describen la dinámica del proceso natural en el espacio-tiempo y que constituyen la base para la determinación de las condiciones de carga para las estructuras construidas. Los modelos empleados en esta fase permiten identificar la iniciación de los procesos y simular la dinámica de propagación desde las zonas incipientes hacia las zonas de deposición. Estos modelos, por tanto, son propedéuticos para la segunda fase, correspondiente al desarrollo de un modelo de impacto, el cual describe las condiciones de carga para las estructuras afectadas, permitiendo cuantificar las fuerzas que actúan sobre estas (Autor et al., 2014).

Diferentes autores han levantado antecedentes teóricos y prácticos con relación a diversos peligros naturales hidrológicos, ocurridos en distintas partes del mundo. En Autor et al. (2019) se ejemplifican los patrones de amenaza que pueden ocurrir en cuencas hidrográficas afectadas por fuentes de disturbio como erupciones volcánicas, remociones en masa gatilladas por terremotos y vaciamientos súbitos de lagos glaciares (GLOF). En Suda & Rudolf-Miklau (2012), por su parte, se describen y analizan los antecedentes en relación con los modelos de proceso e impacto asociados a los patrones de amenaza que ocurren típicamente en los Alpes Europeos. Por otro lado, Papathoma et al. (2019) desarrollaron indicadores para cuantificar la vulnerabilidad de las viviendas frente a eventos de tsunamis.

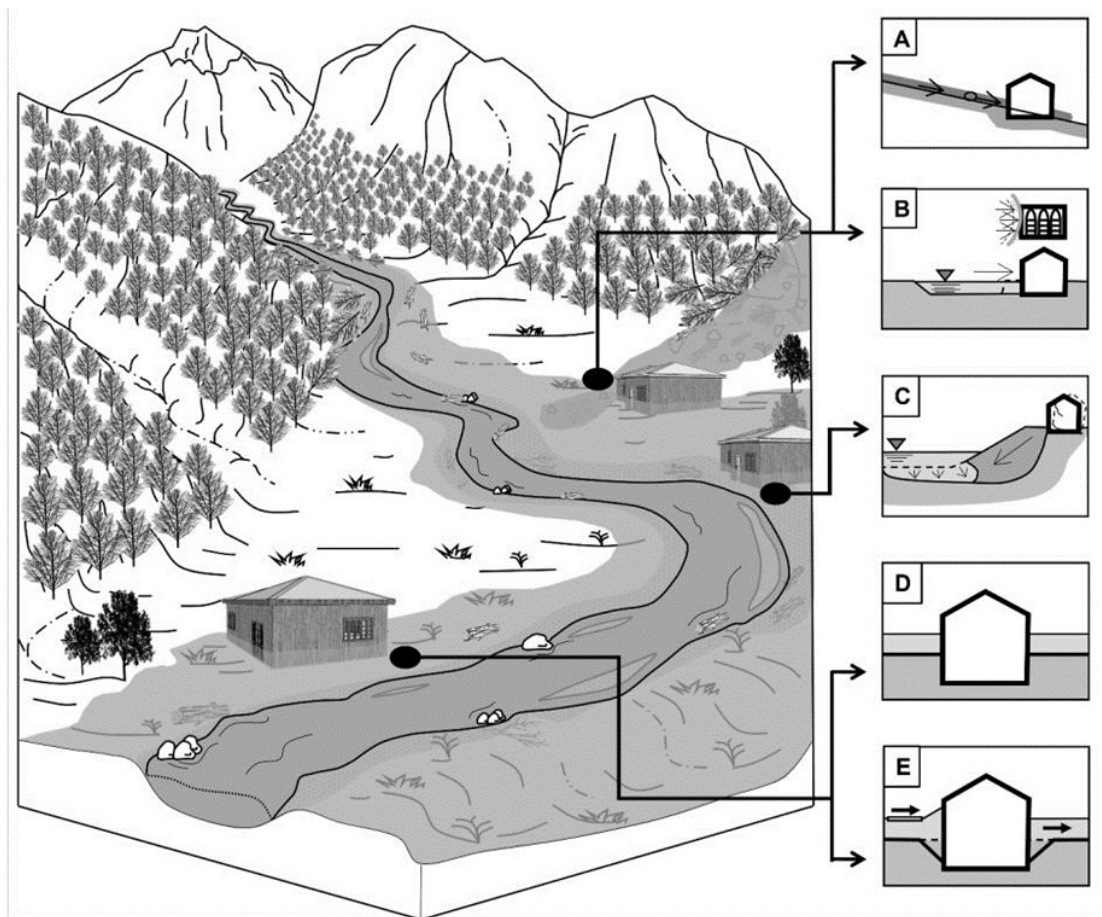
Sin embargo, para el territorio austral de Chile, al cual hace referencia el presente trabajo, no existen propuestas que relacionen los tipos de peligros que aquí ocurren con las características particulares del entorno construido. Ante esta problemática, se desarrolla una ruta metodológica con el objetivo de identificar y cuantificar los procesos asociados a amenazas hidrológicas en las cuencas montañosas de este territorio, poniendo énfasis en las inundaciones dinámicas causadas por la propagación de flujos multifásicos, es decir, flujos cargados de sedimentos que pueden, en ocasiones, transportar también grandes cantidades de madera de gran tamaño (Large Wood – LW), y determinando sus interacciones con el entorno construido (Ruiz-Villanueva et al., 2019). De esta forma, se plantea a partir del análisis del entorno construido y los patrones de amenaza, el desarrollo sistemático de los modelos de proceso, de impacto y los escenarios de respuestas de forma tanto cualitativa como cuantitativa, con el fin de identificar los nexos causales a intervenir en el desarrollo de estrategias de mitigación del riesgo eficaces y así contribuir a una mayor resiliencia de los entornos construidos.

1.1. Procesos asociados a peligros naturales en cuencas de la Patagonia Chilena

La zona austral de Sudamérica, se caracteriza por la posibilidad latente de amenazas naturales de distinto origen, ya sean i) geológicos, como terremotos y remociones en masa; ii) hidrometeorológicos, asociado a eventos de precipitaciones extremas, inundaciones y sequías; iii) volcánicos, como flujo de lahares, la expulsión de grandes cantidades de cenizas y piroclastos; y iv) glaciológicos, asociados principalmente a vaciamientos de lagos de origen glaciar (Lagos et al., 2010; Rojas et al., 2014; Iribarren Anaconda et al., 2015). Dicho esto, es importante mencionar que a menudo se ha observado una interacción entre distintos eventos naturales que ocurren en un tiempo y espacio determinado, que generan amenazas aún más complejas (Suda & Rudolf-Miklau, 2012; Autor et al., 2019).

Los patrones de amenazas hidrometeorológicas identificados para una zona representativa del sur de Chile, asociados a la propagación de un flujo multifásico pueden ser divididos según la forma en que ponen en peligro las viviendas (Figura 1). En presencia de grandes cantidades de material sólido transportado (madera y/o detritos) y elevadas pendientes, se pueden generar flujos de escombros (Fig. 1A). Según el cambio morfológico producido, se diferencia entre cambios morfológicos directos (incisión, avulsión y migración lateral del cauce) (Fig. 1B) y cambios morfológicos inducidos como remociones en masa causadas por erosión fluvial de las orillas de los cauces (Fig. 1C). Además, dependiendo de la cinemática de la inundación se pueden diferenciar zonas en que se observan patrones de inundación estáticos o dinámicos (Fig. 1D y 1E respectivamente).

Figura 1. Patrones de amenaza representados en una zona del sur de Chile. A) Flujo de escombros. B) Erosión fluvial. C) Remoción en masa causada por erosión fluvial D) Inundación Estática. E) Inundación dinámica.



Fuente: Elaboración propia, modificado de Suda & Rudolf-Miklau, 2012.

2. Metodología

La propuesta metodológica en el presente estudio se definió a través de investigaciones realizadas por Suda & Rudolf-Miklau (2012) y Autor et al., (2014, 2019) y en el marco del Proyecto ANID/Fondecyt 1200091: Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT). Este trabajo se complementó con una extensa revisión bibliográfica, utilizando el método de la “bola de nieve” (Baltar & Gorjup, 2012), caracterizado por ampliar progresivamente las referencias bibliográficas a partir de las referencias ya conocidas.

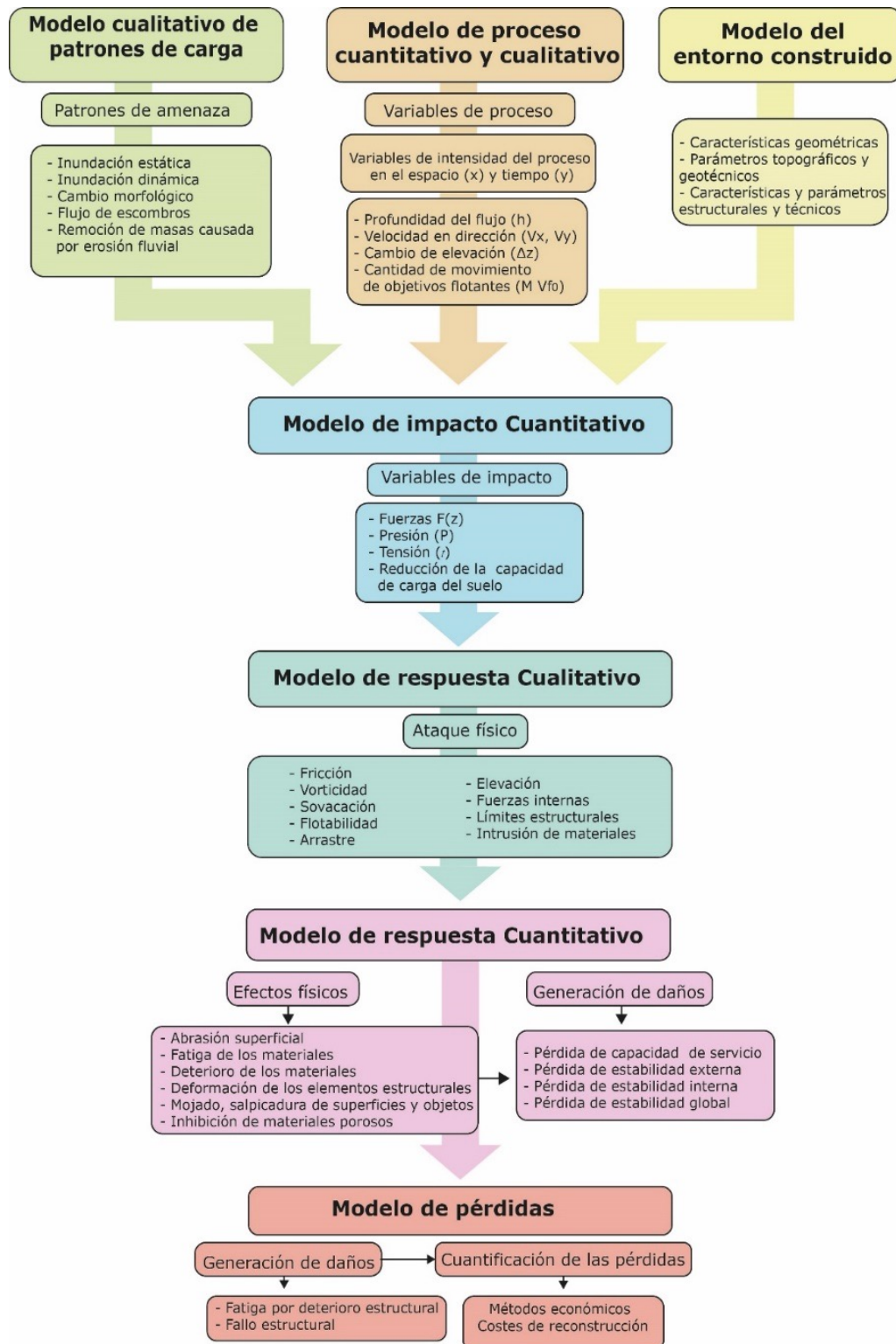
De esta manera, debido a lo complejo de los procesos y sus interacciones, se plantea la necesidad de concatenar los procesos asociados a riesgos hidrológicos de una forma integrada a partir de un razonamiento tanto cualitativo como cuantitativo (Scholz & Tietje, 2002), basándose el primero en una descripción conceptual de los fenómenos mientras que en el segundo se genera información importante para diseñar estrategias con el fin de reducir los impactos en el entorno construido. A partir de esta integración del conocimiento, se puede desarrollar una comprensión de los escenarios de proceso, impacto y respuesta más acabada, poniendo énfasis en la explicación de los nexos de causa y efecto aumentando la confiabilidad y objetividad del análisis. Además, se mejora la reproducibilidad de los hallazgos y se permite su revisión crítica incorporando en cualquier momento nuevos conocimientos científicos disponibles.

En base a los antecedentes reportados en el apartado precedente y con el fin de abordar y analizar la interacción entre un flujo hidrodinámico y el entorno construido, se propone la ruta metodológica expuesta en la Figura 2. Cabe destacar que el presente trabajo no profundiza en la modelización de las pérdidas económicas y remitimos al lector a la literatura específica en dicha temática (Gallerani et al., 2011; Gerl et al., 2016; Fuchs et al., 2019b).

2.1. Modelo del entorno construido

El modelo del entorno construido se elabora a partir de la recopilación de: i) características geométricas, ii) parámetros topográficos y geotécnicos y, iii) características y parámetros estructurales y técnicos. En el primer ítem se deben identificar las características geométricas en un trabajo de terreno, como las aberturas y envolventes de los edificios, por ejemplo; la cantidad, la dimensión y la posición de puertas y ventanas. A su vez, los parámetros topográficos del entorno se pueden obtener mediante utilización de SIG a través de un modelo digital de elevación (DEM) e imágenes satelitales de buena resolución. La descripción de las características geotécnicas del terreno puede requerir levantamientos específicos y análisis de laboratorio. En casos favorables estas características se pueden desprender de informes técnicos existentes. Finalmente, en cuanto a las características y parámetros estructurales y técnicos, estos datos se podrían obtener mediante encuestas realizadas en trabajo de terreno para la estandarización y descripción del entorno construido, por ejemplo, los materiales de construcción.

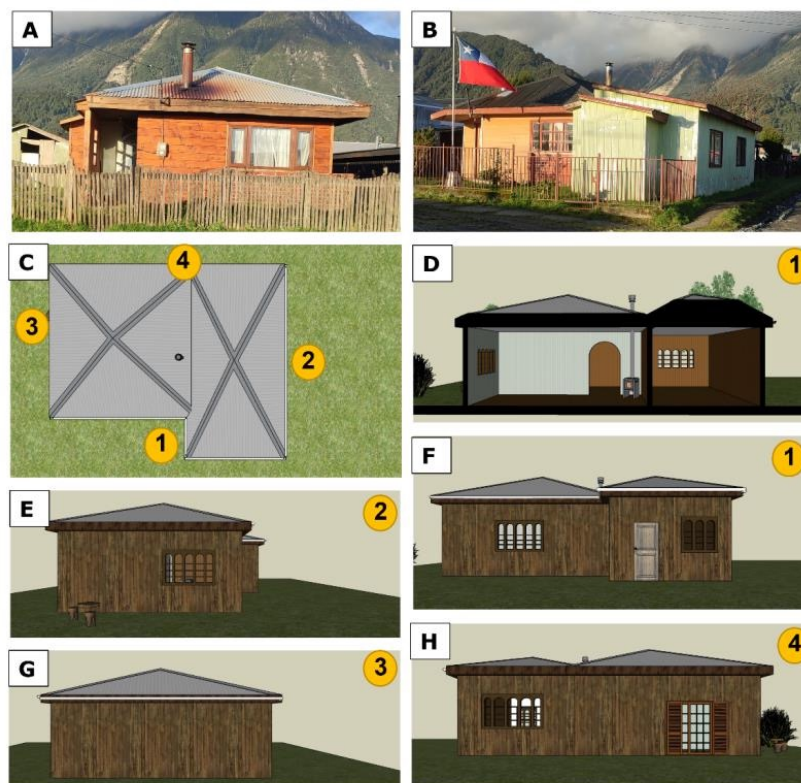
Figura 2. Esquema metodológico propuesto para determinar escenarios de interacción entre procesos fluviales y el entorno construido residencial.



Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo de las características del entorno construido expuesto a las amenazas, en la Figura 3, se ilustra el tipo de vivienda que se encuentra comúnmente en zonas rurales del sur de Chile.

Figura 3. Viviendas típicas de un entorno rural en zonas del sur de Chile. A) y B) Fotografías de casas tomadas en la ciudad de Chaitén. C) Vista en planta de la vivienda en donde se enumeran las fachadas que se ilustran en las imágenes E, F, G y H. En D) se propone una vista del espacio interior de la vivienda.



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Modelo de proceso

2.2.1. Modelo de proceso cualitativo

El punto de partida para una evaluación integral de peligros en causas de montaña es identificar a los procesos naturales pertinentes. Para esto, es fundamental tener en cuenta la morfometría de la cuenca hidrográfica y la densidad de redes de drenaje, así como también la geología (propiedades del suelo, exposición) y la cobertura que presenta (bosque, pastizal, nieve) para estimar la disponibilidad de sedimentos y madera que pudieran ser removidos durante un evento hidrometeorológico. Por consiguiente, hay variados métodos de análisis, donde al integrar la investigación de sucesos pasados, la evaluación de expertos y la prognosis de sucesos meteorológicos futuros, se establecen escenarios de eventos que describen las posibles secuencias de un proceso de peligro hidrológico, considerando tanto las causas como los efectos (secuencias) posibles (Suda & Rudolf-Miklau, 2012).

Hasta el momento, se han logrado resultados prometedores en diferentes análisis probabilísticos respecto a respuesta hidrológica en cuencas hidrográficas (Rigon et al., 2011), al inicio de deslizamientos (Brunetti et al., 2010), y erosión lateral (Williams et al., 2020), así como con respecto a los procesos de reclutamiento de madera (Autor et al., 2019) y el inicio de flujos de detritos (Liu et al., 2020). Estas contribuciones individuales deben combinarse en términos de integración del conocimiento para reflejar el comportamiento de los sistemas en consecuencia.

Particularmente, con el fin de mejorar la evaluación de peligros y riesgos para los arroyos de montaña, los cuales son particularmente susceptibles a inundaciones repentinas con cargas de sedimentos y escombros. En Autor et al. (2012b), se propone un flujo metodológico cuyo objetivo se dirige directamente al tratamiento de las incertidumbres de las variables de carga del sistema.

2.2.2. Modelo de proceso cuantitativo en el sistema de respuesta

Dado que los resultados del desarrollo de escenarios para el sistema de carga (es decir, la cuenca hidrográfica) proporcionan la entrada para el análisis del sistema de respuesta (SR) y, teniendo en cuenta que el sistema de respuesta incluye las áreas no confinadas que están sujetas a inundaciones (Autor et al., 2012b), se presenta una síntesis de los pasos metodológicos para analizar la propagación del proceso en el sistema de respuesta. Poniendo énfasis en la comprensión del comportamiento del sistema con respecto a dos tipos principales de dominios espaciales, es decir, dominios estocásticos y cuasi-determinísticos, basados en la predictibilidad de su dinámica.

En la Tabla 1, se muestran los pasos analíticos para el análisis de la propagación de los procesos fluviales en el sistema de respuesta (SR) facilitando el seguimiento de los esfuerzos necesarios y los conocimientos correspondientes obtenidos.

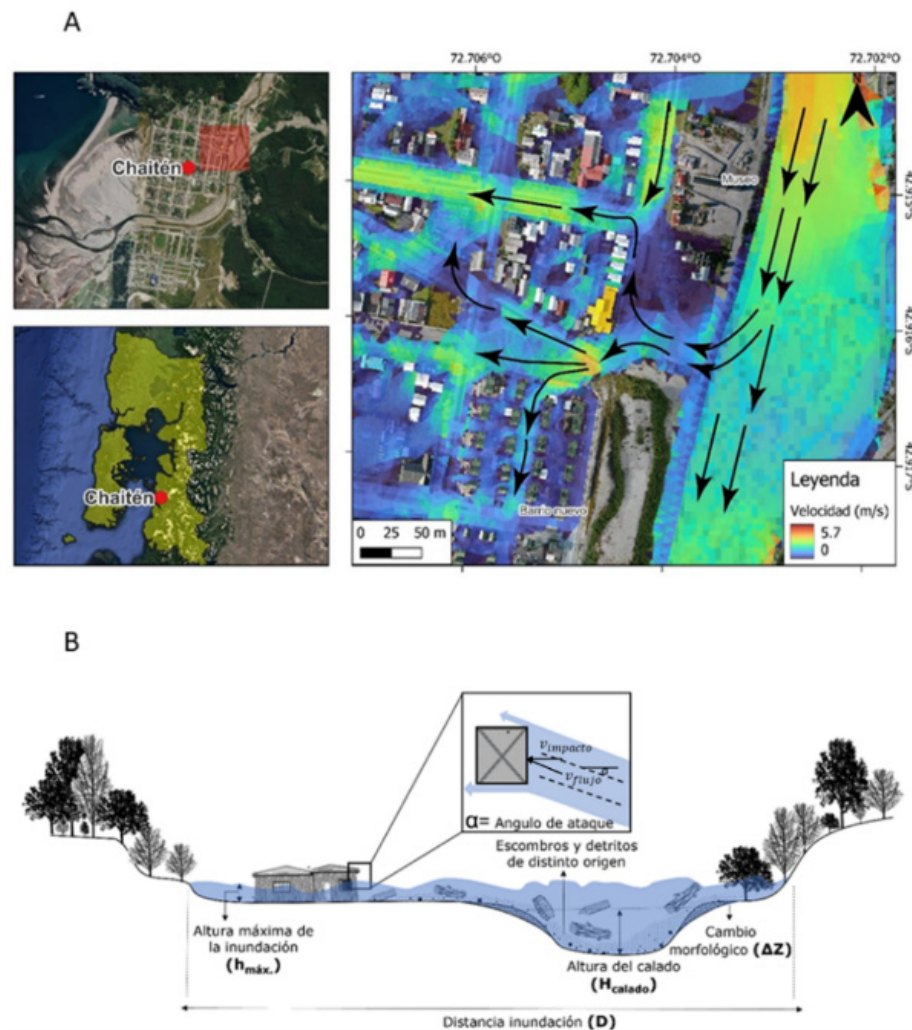
Para ejemplificar los resultados obtenibles aplicando los pasos metodológicos descritos en este apartado y resumidos en la Tabla 1, en la Figura 4 (Panel A), se visualiza un escenario de inundación catastrófico en la ciudad de Chaitén que contempla un caudal de $1000\text{m}^3/\text{s}$, donde se observan las velocidades de flujo (con valores que fluctúan entre 1-4 m/s con picos de más de 6 m/s), direcciones de flujo y la manera en que esto interactúa con el entorno natural y construido. En la Figura 4 (Panel B) se ilustra gráficamente el patrón de amenaza correspondiente a una inundación dinámica para una vivienda típica especificando las variables consideradas.

Tabla 1. Principales pasos del análisis del proceso en el sistema de respuesta

PASOS	ACCIÓN	ASPECTOS DEL PROCEDIMIENTO	RESULTADOS	EJEMPLIFICACIÓN
1	Delimitación y caracterización del sistema de respuesta	Análisis morfológico del valle, su confinamiento y sustrato. Análisis de los usos de suelo actuales y posibles futuros. Recopilación sobre inundaciones pasadas para verificar el dominio del SR.	Set de datos como modelos digitales del terreno, uso de suelo, valores en riesgo, entradas y validaciones de modelos de flujo hidrodinámicos.	El SR corresponde al corredor fluvial donde se emplaza la ciudad de Chaitén oportunamente delimitado (Figura 5, Panel A).
2	Identificación de los dominios estocásticos relevantes dentro de los sistemas de respuesta vulnerables	Identificación de estructuras hidráulicas poco fiables que interactúan con el flujo y posiblemente causen graves consecuencias. Análisis implica estudio de eventos pasados y recopilación de conocimientos expertos específicos del sitio.	Partición de dominio de SR en nodos estocásticos identificados espacialmente y el dominio cuasi-determinístico circundante.	El dominio estocástico más relevante es la sección del puente de la carretera Austral.
3	Determinación de los posibles estados del sistema para cada nodo estocástico y estimación de las probabilidades de transición	Formular hipótesis sobre posibles rangos de condiciones de carga en términos de intensidades de inundación y definir un número limitado de estados relevantes para cada nodo estocástico. El juicio de expertos es fundamental para la estimación de la probabilidad de transición de estado.	Para cada nodo se construye una matriz de probabilidades de transición de estado atinentes a la intensidad del proceso, que contiene todas las probabilidades de transición de estado posibles.	Considerando plausibles dos estados estocásticos para un dominio: a – sección disponible; b – sección obstruida. Con probabilidad de transición de a a b: $P_{T(a \rightarrow b/TRcrecida)} = 0.5$. El escenario de inundación con el puente obstruido tendría la probabilidad de ocurrencia: $P_{ocurrencia} = P_{T(a \rightarrow b/TRcrecida)} \cdot \frac{1}{TRcrecida}$
4	Determinación de la dinámica de la inundación mediante simulaciones hidrodinámicas acorde a cada evento de entrada individual, de acuerdo con el alcance del estudio.	Interconectar resultados de simulaciones hidrodinámicas con las matrices de probabilidad de transición de estado. Al introducir supuestos previos, fijando estados relevantes para la duración total del evento en cada nodo, resulta un número reducido de posibles constelaciones de sistemas, cada una con una probabilidad definida. El juicio de expertos es esencial para ajustar el nivel de simplificación de acuerdo con el alcance del estudio.	Para cada evento de entrada se obtiene una estructura estocástica de evolución espacial y temporal simplificada de inundación. Se obtienen mapas de intensidad de inundación.	La dinámica de la inundación se puede determinar con varias herramientas de simulación hidrodinámica. La Figura 5, Panel A (lado derecho) muestra un mapa de velocidades de flujo generadas por escenario de inundación catastrófico en Chaitén. En la Figura 5, Panel B, se ejemplifica el escenario de proceso para una vivienda prototipo.

Fuente: (Modificado de Autor et al., 2012b).

Figura 4. Panel A: Mapa de velocidades de flujo de un escenario de inundación de gran magnitud sobre la ciudad de Chaitén. Panel B: Representación gráfica de una inundación dinámica, se ilustran las variables del modelo de proceso que caracterizan a este patrón de amenaza.

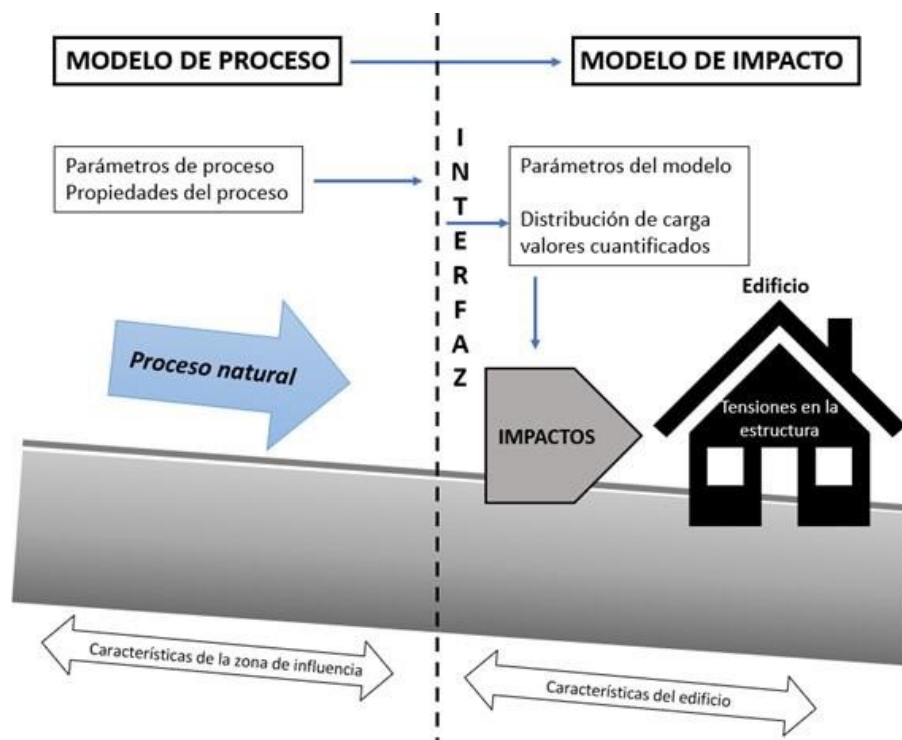


Fuente: Elaboración propia. Panel A a partir de escenario de referencia en Autor et al. (2023).

2.3. Modelos de impacto

Sobre la base de la caracterización del sistema, resultante de la aplicación de los modelos anteriormente expuestos, se procede a una cuidadosa identificación del modelo de impacto el cual es imprescindible para describir la interacción del proceso natural con la construcción afectada (Suda & Rudolf-Miklau, 2012). Para ello es necesario definir un volumen de control imaginario cuya superficie envuelva la construcción afectada y que defina una interfaz entre el modelo de proceso y el modelo de impacto. En correspondencia de esta interfaz, los valores de las variables del modelo de proceso (ver Figura 4) se “traducen” en la definición y cuantificación de las condiciones de carga para la construcción considerada (ver Figura 5).

Figura 5. Transición del modelo de proceso hacia modelo de impacto definiendo una interfaz donde las variables cuantificadas que describen el proceso se “traducen” en condiciones de carga cuantificadas para el objeto del entorno construido considerado.



Fuente: Modificado de Suda & Rudolf-Miklau, 2012.

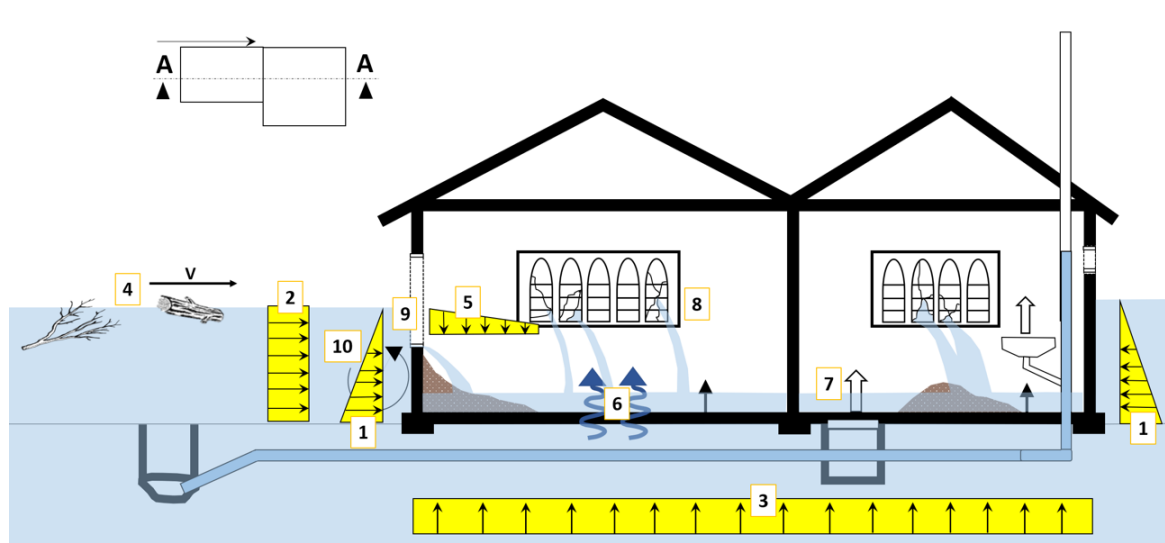
2.3.1. Modelo cualitativo de condiciones de carga

En primer lugar, para definir un modelo de las condiciones de carga, es necesario identificar el patrón de amenaza que determina las condiciones de carga para el edificio considerado. En este sentido, el patrón de amenaza de una inundación dinámica de flujo multifásico según Suda & Rudolf-Miklau (2012) se debe clasificar en función de su variación temporal (estacionaria/variable), origen (directo/indirecto), distribución espacial (fija/variable) y naturaleza (estático/dinámico).

Además, según Suda & Rudolf-Miklau (2012) las crecidas en ríos se pueden clasificar en primera instancia, dependiendo de la velocidad del flujo y del calado, distinguiendo de tal modo dos niveles de intensidad: i) estáticas (velocidad de flujo menor a 0,5 m/s y número de Froude <1) y ii) dinámicas (velocidades de flujo entre 3 a 5 m/s y número de Froude >1). A su vez, también se pueden clasificar según su capacidad de modificar la topografía: iii) cambio morfológico (incisión y/o erosión lateral), iv) flujo de escombros y v) remoción en masa causada por erosión fluvial (Suda & Rudolf-Miklau, 2012; Autor et al., 2019).

Por otro lado, con respecto al desarrollo de los procesos de impacto, hay que inferir un modelo cualitativo que esquematice las condiciones de carga y su distribución sobre cada fachada del edificio impactado según los patrones de amenaza que se hayan desprendido del modelo de proceso. En la Figura 6, se visualizan las condiciones de carga para un prototipo de una tipología constructiva típica del sur de Chile (Suda & Rudolf-Miklau, 2012).

Figura 6. Modelo de las condiciones de carga para un prototipo de una vivienda típica del sur de Chile asociado a un patrón de amenaza de inundación dinámica. Los detalles de las condiciones de carga son reportados según la numeración en el texto.



Fuente: Elaboración propia, modificado de Suda & Rudolf-Miklau (2012).

Las principales condiciones de carga para una vivienda causadas por una inundación dinámica a considerar en la construcción del modelo de impacto según la numeración de la Figura 8 son:

1. Distribución de presión hidrostática generada por el flujo multifásico sobre las superficies afectadas resultando en fuerzas hidrostáticas orientadas normalmente a las superficies expuestas;
2. Distribución de presión hidrodinámica generada por el flujo multifásico que afecta a la vivienda resultando en fuerzas hidrodinámicas orientadas normalmente a las superficies expuestas. En caso de presencia de cimientos tipo pilotes el flujo puede pasar por debajo de la envoltura estructural. En esta condición se generan también fuerzas hidrodinámicas (lift force) orientadas en dirección vertical hacia arriba.
3. Distribución de presión de levantamiento sobre los cimientos de losa debida a la saturación del suelo de construcción y del material depositado alrededor de la vivienda como también a la transmisión de las sobrecargas de los volúmenes de fluido multifásico que se propaga. Las fuerzas resultantes son orientadas verticalmente hacia arriba.
4. Distribución de presión dada por los volúmenes de sedimentos depositados en contacto con las paredes (generando un empuje hacia ellas).
5. Impacto de objetos de gran tamaño (troncos de árboles, raíces, rocas, vehículos arrastrados). Se asume que estos objetos son transportados con la misma velocidad y en la misma dirección en que se propaga el flujo. En este caso se generan fuerzas de punzonamiento en zona de impacto. En este trabajo asumimos que estas fuerzas sean orientadas normalmente a las superficies expuestas.
6. Sobrecargas en el interior del edificio si se da la intrusión de agua y sedimento a través de aberturas en la envoltura del edificio, tales como puertas, ventanas, ductos de ventilación.
7. Cargas forzadas sobre la estructura soportante, generadas por el cambio morfológico (erosión generalizada alrededor del edificio), por socavación local o por la pérdida de la capacidad portante del suelo de construcción.

8. Ataque físico y químico debido al contacto del fluido y de los sedimentos transportados con las superficies afectadas ya sea externas ya sea internas si el fluido logra entrar producto del desborde del servicio de alcantarillado o de la infiltración a través de fugas.

2.3.2. Modelo de impacto cuantitativo

Para construir el modelo de impacto cuantitativo consideramos las primeras cinco condiciones de carga del listado presentado en el apartado anterior. La cuantificación de las sobrecargas en el interior del edificio (condición 6) es de difícil cuantificación ya que primero hay que determinar las vías de intrusión y estas no son siempre identificables. Autor et al. (2014) sugiere de proyectar (geométricamente) el área mojada del flujo multifásico sobre la envoltura estructural y determinar el solape con las aberturas en la envoltura y considerar afectados los cuartos adyacentes como afectados. La evaluación de los impactos relacionados a esta condición de carga permanece a un nivel cualitativo. La cuantificación de los impactos generados por el cambio morfológico y procesos asociados (condición 7) presupone la detección de la magnitud de los cambios utilizando modelos morfodinámicos, como lo es, por ejemplo, el Iber (Bladé et al., 2014; Ruiz-Villanueva et al., 2019). Se señala que los resultados de las simulaciones morfodinámicas pueden ser afectas por incertidumbre. Los impactos dados por el ataque físico y químico son difícilmente accesibles a una evaluación cuantitativa. Sugerimos, por lo tanto, deducir cualitativamente estos impactos a través de un panel de expertos. Los expertos podrían, por ejemplo, emplear la técnica del análisis formativo de escenarios.

En la Figura 7 se visualiza el modelo de impacto para un edificio de geometría simplificada (palelepípedo con base rectangular). Respectivamente a la izquierda y a la derecha de las interfaces entre el modelo de proceso y de impacto (líneas verticales 1 y 2) se representa la esquematización del proceso adoptada, es decir, un flujo multifásico de calado D_{F1} (lado izquierdo) y D_{F2} (lado derecho), velocidad V (lado izquierdo), densidad ρ_M que se propaga por arriba de un depósito saturado de espesor D_{D1} (lado izquierdo) y D_{D2} (lado derecho) con características geotécnicas especificadas (ángulo de fricción interna ϕ_D y densidad de la componente solida ρ_D). El suelo de construcción (subyacente al depósito) esta caracterizado geotécnicamente por el ángulo de fricción interna ϕ_{SC} y densidad de la componente solida ρ_{SC} . En la esquematización del proceso se asume también el transporte con velocidad V de un tronco de madera flotante de gran tamaño de masa m_{LW} . La configuración de carga resultante se compone por cada lado por los diagramas triangulares de distribución de presión hidrostática 1,1a y 1,2b respectivamente ($P_{HS,MAX,1,1,a} = \rho_M \cdot g \cdot D_{D,1}$ y $P_{HS,MAX,1,2,a} = \rho_M \cdot g \cdot D_{D,2}$) del fluido. En el lado 1 hay que considerar la presión hidrodinámica del fluido en movimiento y, por tanto, se asume un diagrama rectangular de presión para el espesor $D_{D,1}$ igual a $P_{HD,C,TE,2,1} = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V^2$. Los espesores de depósito saturados generan, ya sea, diagramas de presiones hidrostáticas o diagramas de presión de empuje de la tierra. Los primeros se visualizan por un diagrama triangular de espesor $D_{D,1} + D_{SC,1}$ en el lado izquierdo y de espesor $D_{D,2} + D_{SC,2}$ en el lado derecho. La presión máxima de estos diagramas es igual a:

$$P_{HS,MAX,1,1,c} = \rho_W \cdot g \cdot (D_{D,1} + D_{SC,1})$$

$$P_{HS,MAX,1,2,c} = \rho_W \cdot g \cdot (D_{D,2} + D_{SC,2})$$

La sobrecarga del fluido de calado $D_{F,1}$ (lado izquierdo) y $D_{F,2}$ (lado derecho) transfiere las presiones $P_{HS,MAX,1,1,a}$ y $P_{HS,MAX,1,2,a}$ a estos estratos. Por lo tanto, hay que considerar por cada lado también un diagrama de presión hidrostática rectangular ($P_{HS,C,TE,1,1,b}$ y $P_{HS,C,TE,1,2,b}$). Por lo que concierne los diagramas de presión del terreno por cada lado hay que considerar dos diagramas triangulares con presión máxima dada por:

$$P_{T,MAX,3,1} = K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_w) \cdot g \cdot D_{D,1}$$

$$P_{T,MAX,3,2} = K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_w) \cdot g \cdot D_{D,2}$$

$$P_{T,MAX,4,1,a} = K_{0,SC} \cdot (\rho_{SC} - \rho_w) \cdot g \cdot D_{SC,1}$$

$$P_{T,MAX,4,2,a} = K_{0,SC} \cdot (\rho_{SC} - \rho_w) \cdot g \cdot D_{SC,2}$$

También hay que considerar por cada lado un diagrama rectangular de presión del terreno:

$$P_{T,C,TE,4,1,a} = K_{0,D} \cdot (\rho_{SC} - \rho_w) \cdot g \cdot D_{D,1}$$

$$P_{T,C,TE,4,2,b} = K_{0,D} \cdot (\rho_{SC} - \rho_w) \cdot g \cdot D_{D,2}$$

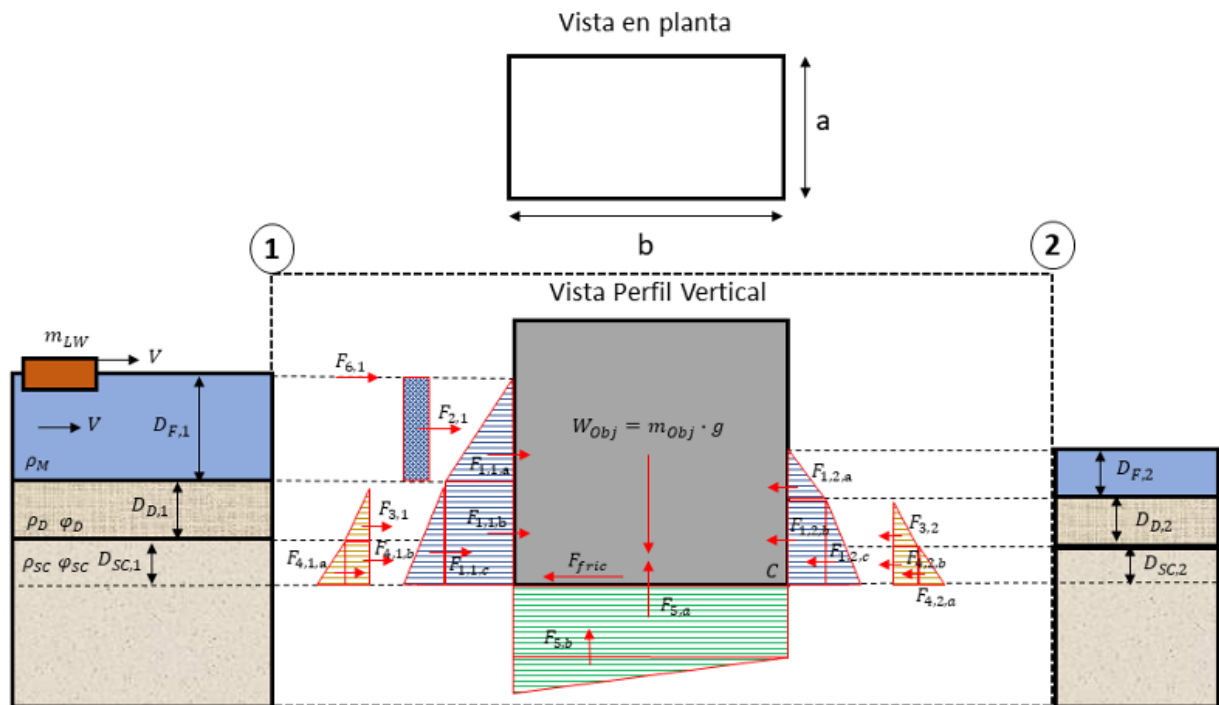
Debido a las distribuciones hidrostáticas que se dan en ambos los lados resulta una distribución de presión de levantamiento trapezoidal. Los valores de las presiones en los extremos están dados por:

$$P_{L,MAX,sx} = \rho_w \cdot g \cdot D_{D,1} + D_{SC,1} + \rho_M \cdot g \cdot D_{D,1}$$

$$P_{L,MAX,dx} = \rho_w \cdot g \cdot D_{D,2} + D_{SC,2} + \rho_M \cdot g \cdot D_{D,2}$$

La altura del diagrama trapezoidal corresponde al lado b (uno de los dos lados non expuestos) de la base rectangular del edificio.

Figura 7. Modelo de impacto para una vivienda de geometría simplificada.



Características físicas del proceso (calados $D_{F,1}$ y $D_{F,2}$, velocidad V , densidad de la mixtura ρ_M), geotécnicas de los depósitos (densidad del material sólido ρ_D , densidad del agua ρ_w , ángulo de fricción interna φ_D) y del suelo de construcción (densidad del material sólido ρ_{SC} , densidad del agua ρ_w , ángulo de fricción interna φ_{SC}) que dan lugar a las condiciones de carga para el edificio considerado (diagramas de presión hidrostáticas, diagramas triangulares y rectangulares con líneas horizontales azules), hidrodinámicas (diagrama rectangular con tramado azul), de empuje de la tierra (diagramas triangulares y rectangulares con líneas horizontales rojas), y de levantamiento y de la tierra (diagramas triangulares y rectangulares con líneas horizontales verdes). Se visualiza un objeto flotante con velocidad V (tronco de madera de gran tamaño de masa m_{LW}).

Fuente: Elaboración propia.

En base a las condiciones de carga anteriormente reportadas (es decir, de los diagramas de presión) y de las características del edificio se desprende el modelo de impacto dado por el conjunto de fuerzas, sus orientaciones, sus puntos de aplicación y también por el conjunto de los momentos y sus brazos (ver tabla 2). Dada la configuración de carga dada se desprende el modelo de impacto definido por las fuerzas hidrostáticas ($F_{1,1,a}$, $F_{1,1,b}$, $F_{1,1,c}$ y $F_{1,2,a}$, $F_{1,2,b}$, $F_{1,2,c}$ respectivamente), la fuerza hidrodinámica ($F_{2,1}$), las fuerzas de empuje de la tierra ($F_{3,1}$, $F_{4,1,a}$, $F_{4,1,b}$ y $F_{3,2}$, $F_{4,2,a}$, $F_{4,2,b}$ respectivamente), las fuerzas de levantamiento ($F_{5,a}$ y $F_{5,b}$) y la fuerza de punzonamiento debida a la colisión del tronco de madera con el edificio ($F_{6,1}$). Todas las fuerzas están representadas en la Figura 9 por flechas rojas con su dirección y línea de aplicación sobre la envoltura estructural de peso propio $W = m_{Obj} \cdot g$. Se indica también la fuerza de fricción entre los cimientos del edificio y el suelo de construcción F_{fric} .

Tabla 2: Arquitectura del modelo de impacto cuantitativo. En las columnas (de 1 a 5), se detalla respectivamente las fuerzas que actúan sobre el edificio y su peso propio, su dirección, el brazo de palanca, el sentido de rotación del objeto y el momento resultante para cada fuerza.

Fuerza [N]	Dirección	Brazo [m]	Rotación	Momento [Nm]
Fuerzas hidrostáticas				
$F_{1,1,a} = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot g \cdot a \cdot D_{F,1}^2$	→	$b_{1,1,a} = \frac{1}{3} D_{F,1} + D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{1,1,a} = F_{1,1,a} \times b_{1,1,a}$
$F_{1,2,a} = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot g \cdot a \cdot D_{F,2}^2$	←	$b_{1,2,a} = \frac{1}{3} D_{F,2} + D_{D,2} + D_{SC,2}$	↻	$M_{1,2,a} = F_{1,2,a} \times b_{1,2,a}$
$F_{1,1,b} = \rho_M \cdot g \cdot a \cdot D_{F,1} \cdot (D_{D,1} + D_{SC,1})$	→	$b_{1,1,b} = \frac{1}{2} D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{1,1,b} = F_{1,1,b} \times b_{1,1,b}$
$F_{1,2,b} = \rho_M \cdot g \cdot a \cdot D_{F,2} \cdot (D_{D,2} + D_{SC,2})$	→	$b_{1,2,b} = \frac{1}{2} D_{D,2} + D_{SC,2}$	↻	$M_{1,2,b} = F_{1,2,b} \times b_{1,2,b}$
$F_{1,1,c} = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot g \cdot a \cdot (D_{D,1} + D_{SC,1})^2$	→	$b_{1,1,c} = \frac{1}{3} D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{1,1,c} = F_{1,1,c} \times b_{1,1,c}$
$F_{1,2,c} = \frac{1}{2} \cdot \rho_W \cdot g \cdot a \cdot (D_{D,2} + D_{SC,2})^2$	→	$b_{1,2,c} = \frac{1}{3} D_{D,2} + D_{SC,2}$	↻	$M_{1,2,c} = F_{1,2,c} \times b_{1,2,c}$
Fuerzas hidrodinámicas				
$F_{2,1} = \frac{1}{2} \cdot \rho_M \cdot V^2 \cdot (a \cdot D_{F,1})$	→	$b_{2,1} = \frac{1}{2} D_{F,1} + D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{2,1} = F_{2,1} \times b_{2,1}$
Empuje de la tierra (depósito de sedimento y suelo de construcción) con: $K_{0,D} = 1 - \sin \varphi_D$ y $K_{0,SC} = 1 - \sin \varphi_{SC}$				
$F_{3,1} = \frac{1}{2} \cdot K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{D,1}^2$	→	$b_{3,1} = \frac{1}{3} D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{3,1} = F_{3,1} \times b_{3,1}$
$F_{3,2} = \frac{1}{2} \cdot K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{D,1}^2$	←	$b_{3,2} = \frac{1}{3} D_{D,1} + D_{SC,1}$	↻	$M_{3,2} = F_{3,1} \times b_{3,1}$
$F_{4,1,a} = \frac{1}{2} \cdot K_{0,SC} \cdot (\rho_{SC} - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{SC,1}^2$	→	$b_{4,1,a} = \frac{1}{3} D_{SC,1}$	↺	$M_{4,1,a} = F_{4,1,a} \times b_{4,1,a}$
$F_{4,2,a} = \frac{1}{2} \cdot K_{0,SC} \cdot (\rho_{SC} - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{SC,2}^2$	←	$b_{4,2,a} = \frac{1}{3} D_{SC,2}$	↻	$M_{4,2,a} = F_{4,2,a} \times b_{4,2,a}$
$F_{4,1,b} = K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{D,1} \cdot D_{SC,1}$	→	$b_{4,1,b} = \frac{1}{2} D_{SC,1}$	↺	$M_{4,1,b} = F_{4,1,b} \times b_{4,1,b}$
$F_{4,2,b} = K_{0,D} \cdot (\rho_D - \rho_W) \cdot g \cdot a \cdot D_{D,2} \cdot D_{SC,2}$	←	$b_{4,2,b} = \frac{1}{2} D_{SC,2}$	↻	$M_{4,2,b} = F_{4,2,b} \times b_{4,2,b}$
Fuerza de levantamiento				
$F_{5,a} = a \cdot b \cdot g \cdot [\rho_M \cdot D_{F,2} + \rho_W \cdot (D_{D,2} + D_{SC,2})]$	→	$b_{5,a} = \frac{b}{2}$	↺	$M_{5,a} = F_{5,a} \times b_{5,b}$
$F_{5,b} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot b \cdot [\rho_M \cdot g \cdot (D_{F,2} - D_{F,1}) + \rho_W \cdot (D_{D,1} + D_{SC,1} - D_{D,2} - D_{SC,2})]$	→	$b_{5,b} = \frac{2b}{3}$	↺	$M_{5,b} = F_{5,b} \times b_{5,b}$
Fuerza de punzonamiento de la madera flotante según Suda & Rudolf-Miklau (2012) (u es la deformación en el estado límite, C_k y C_k son constantes específicas)				
$F_{6,1} = C_k \cdot C_p \cdot \frac{m_{LW} \cdot V^2}{2 \cdot u}$	→	$b_{6,1} = D_{F,1} + D_{D,1} + D_{SC,1}$	↺	$M_{6,1} = F_{6,1} \times b_{6,1}$
Peso propio objeto impactado				
$F_{obj} = W = m_{obj} \cdot g$	↓	$b_{obj} = \frac{1}{2} b$	↻	$M_{obj} = F_{obj} \times b_{obj}$
Fuerza de fricción (interfaz objeto – suelo de construcción)				
$F_{fric} = \mu_{fric} \cdot [m_{obj} \cdot g - (F_{5,a} + F_{5,b})]$	←	$b_{fric} = 0$		

Fuente: Elaboración propia, adaptado de FEMA P-259, 2012.

Cabe destacar que cuando el flujo fluye alrededor de la estructura, se añaden cargas adicionales que van en función de la velocidad del flujo y de la geometría de la construcción. Estas fuerzas conocidas como *hidrodinámicas* pueden ser clasificadas como fuerzas de alta (sobre 3m/s) y baja velocidad (hasta 3m/s), donde, en la última mencionada para calcular su carga sobre una estructura se realiza una transformación hacia “fuerza hidrostática equivalente” (FEMA P-259, 2012).

Además, como se mencionó anteriormente, debido a que estos flujos multifásicos cargados de sedimentos pueden también transportar grandes cantidades de troncos y árboles, es necesario tener en cuenta las fuerzas de punzonamiento generadas sobre la estructura del edificio (Suda & Rudolf-Miklau, 2012).

2.4. Modelos de respuesta

Con las variables de impacto cuantificadas y considerando el modelo del entorno construido, el siguiente paso cualitativo consiste en especificar todos los mecanismos de ataque físico a los que puede estar sometida la estructura portante, la envolvente del edificio y las partes interiores. En otras palabras, hay que identificar el conjunto de desencadenantes de los efectos físicos que pueden generar daños, evaluar la intensidad y duración del impacto sobre las superficies expuestas para, posteriormente deducir los mecanismos de daño específicos.

El primer tipo de mecanismos puede conllevar a la pérdida de equilibrio estático de toda la estructura o de partes específicas, consideradas todas como cuerpos rígidos. En estos casos, pequeñas diferencias en las condiciones de carga consideradas y el peso muerto de las partes estructurales son relevantes, mientras que la resistencia de los materiales de construcción o el terreno del edificio no tienen influencia.

El segundo tipo de mecanismos tiene a ver con la falla o deformación excesiva de la estructura o sus partes, incluyendo la cimentación y pilotes. En este contexto, la máxima carga que puede soportar un elemento estructural es considerablemente más pequeña que la carga última (Beer et al., 2017). A esta carga se le llama carga permisible. Su relación con la carga última está dada por:

$$\text{carga permisible} = \frac{\text{carga última}}{FS}$$

Donde:

FS es el factor de seguridad. Beer et al. (2017) sugieren elegir el valor del factor de seguridad según los siguientes criterios: i) variaciones que pueden ocurrir en la propiedades del elemento estructural, ii) número de cargas que pueden esperarse durante la vida de la estructura, iii) tipo de cargas que se han planteado para el diseño y tipo de fallas esperadas, iv) deterioro estructural, v) importancia de un elemento dado para la integridad de la estructura completa y vi) incertidumbres asociadas a los métodos de análisis empleados. En este sentido es importante considerar que los edificios residenciales solo en raras ocasiones han sido diseñados específicamente para resistir a los impactos de las inundaciones.

Para la flexión de una viga prismática, por ejemplo, la susceptibilidad al daño estructural (falla) se da en el caso:

$$S_{ef} < S_{min} = \frac{|M|_{max}}{\sigma_{perm}}$$

O sea, el caso en que la sección efectiva del elemento estructural cargado, S_{ef} sea menor que la sección mínima que resistiría a flexión a través del esfuerzo normal permisible para el material utilizado, σ_{perm} , dado el momento flector máximo en valor absoluto, $|M|_{max}$, en la sección considerada.

El tercer tipo de mecanismos puede comportar la falla o deformación excesiva del terreno del edificio, mientras que la capacidad de carga del suelo (o roca) es decisiva. En relación con estos mecanismos hay que considerar también la posible socavación local de los cimientos del edificio (debida a la vorticidad inducida por el flujo en la capa límite alrededor de la envoltura del edificio) y los cambios morfológicos en los alrededores del edificio que imponen vínculos externos modificados.

Finalmente, el cuarto tipo de mecanismos puede implicar la falla de la estructura como consecuencia de la fatiga y la abrasión de las partes expuestas de la envoltura del edificio, la formación de cavidades y grietas, como también el deterioro de las características mecánicas de los materiales.

El modelo de respuesta cuantitativo que se detalla a continuación ahonda solamente en el primer tipo de mecanismos, es decir el análisis de la pérdida potencial de estabilidad externa, donde, bajo el ataque físico en forma de arrastre, elevación y flotación, la estructura puede deslizarse, volcarse o flotar. Para el análisis cuantitativo del segundo tipo de mecanismos el lector puede hacer referencia a los trabajos de Autor et al. (2014) y Milanesi et al. (2018), mientras que para el tercer tipo de mecanismos señalamos el texto de Kolymbas (2022). El cuarto tipo de mecanismos ha sido estudiado en forma específica para algunos tipos de estructuras residenciales (Hu et al., 2012).

Para analizar la estabilidad de estructuras construidas o diseñar estructuras que resistan de mejor manera inundaciones, se toma como referencia las indicaciones de FEMA (FEMA-P-259, 2012), adaptándolas a un cubo que represente de manera simplificada una edificación (Figura 9). De esta forma, se realizan verificaciones de inestabilidad por de deslizamiento (sliding) y volcamiento (overturning).

2.4.1. Factor de Seguridad contra el Deslizamiento

Para que la estructura sea estable, la suma de las fuerzas de resistencia debe ser mayor a las fuerzas de deslizamiento.

Definimos:

$$F_{1,1} = F_{1,1,a} + F_{1,1,b} + F_{1,1,c}$$

$$F_{1,2} = F_{1,2,a} + F_{1,2,b} + F_{1,2,c}$$

$$F_{4,1} = F_{4,1,a} + F_{4,1,b}$$

$$F_{4,2} = F_{4,2,a} + F_{4,2,b}$$

La suma de todas las fuerzas resistentes al deslizamiento está dada por:

$$F_R = F_{1,2} + F_{3,2} + F_{4,2} + F_{fric}$$

La suma de todas las fuerzas que favorecen el deslizamiento es:

$$F_D = F_{1,1} + F_{2,1} + F_{3,1} + F_{4,1} + F_{6,1}$$

La relación entre estas fuerzas se conoce como Factor de Seguridad contra el deslizamiento ($FS_{(SL)}$).

$$FS_{(SL)} = \frac{F_R}{F_D} \geq 1,5$$

Donde:

F_R = suma de las fuerzas de resistencia al deslizamiento (N)

F_D = suma de fuerzas de deslizamiento (fuerzas hidrostáticas acumuladas y fuerzas de impacto de objetos) (N)

2.4.2. Factor de Seguridad contra el Volcamiento

La posibilidad de vuelco debe comprobarse en la esquina inferior de la estructura aguas abajo (punto C). Para una condición estable, la suma de los momentos de resistencia, M_R , debe ser mayor que la suma de los momentos de vuelco, M_O . La relación de M_R sobre M_O se denomina factor de seguridad contra vuelco, $FS_{(OT)}$.

En base a la Tabla 2 definimos analíticamente:

$$M_{1,1} = M_{1,1,a} + M_{1,1,b} + M_{1,1,c}$$

$$M_{1,2} = M_{1,2,a} + M_{1,2,b} + M_{1,2,c}$$

$$M_{4,1} = M_{4,1,a} + M_{4,1,b}$$

$$M_{4,2} = M_{4,2,a} + M_{4,2,b}$$

$$M_5 = M_{5,a} + M_{5,b}$$

Por lo tanto:

$$M_R = M_{1,2} + M_{3,2} + M_{4,2} + M_{Obj}$$

$$M_O = M_{1,1} + M_{2,1} + M_{3,1} + M_{4,1} + M_5 + M_{6,1}$$

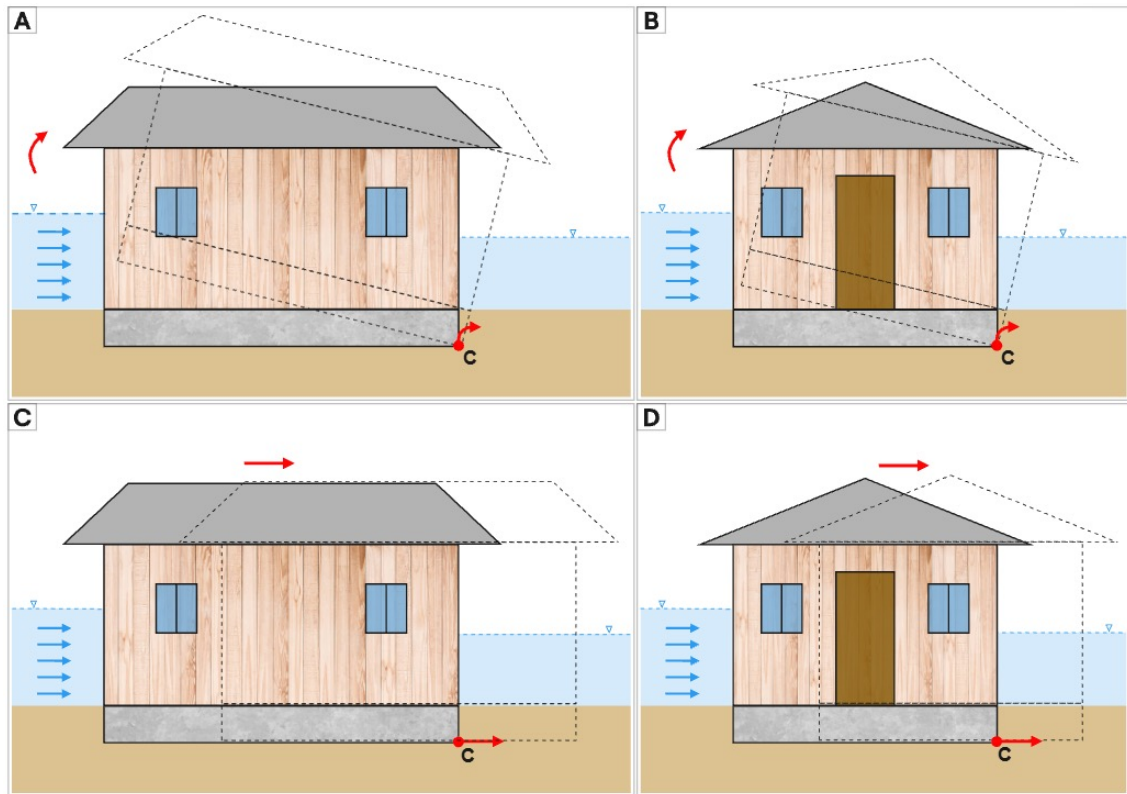
Así que:

$$FS_{(OT)} = \frac{M_R}{M_O} \geq 2$$

Por tanto, el momento de resistencia (M_R) es igual a la suma de los momentos de resistencia en [Nm] y el momento de volcamiento (M_O) es la suma de los momentos de volcamiento en [Nm].

Para la estimación de los factores de seguridad $FS_{(OT)}$ y $FS_{(SL)}$, se considerará como brazo de torque el ancho y largo de cada vivienda respectiva (Figura 8).

Figura 8. Esquema del chequeo de estabilidad para la edificación. El panel A indica la rotación de la vivienda en relación al largo; Panel B indica la rotación de la vivienda en relación al ancho; Panel C indica deslizamiento de la vivienda en relación al largo; Panel D indica deslizamiento de la vivienda en relación al ancho.



Fuente: Elaboración propia.

2.5. Modelo de contabilización de daños

Sobre la base de las consideraciones cualitativas y de las evaluaciones cuantitativas realizadas en la etapa de modelización anterior, hay que deducir, a través de juicio experto, escenarios de daño plausibles como base para la estimación de las pérdidas resultantes. Los escenarios de daño deberían describir los siguientes hechos: Pérdida de elementos estructurales, destrucción de partes de la envolvente del edificio, deterioro de la materialidad y disminución de la resistencia para los futuros impactos, pérdida de la capacidad de servicio y de la funcionalidad, así como pérdida y daño de equipos, mobiliario, etc. Si se quisiera valorar las potenciales pérdidas se sugiere operar con el criterio económico del valor de reconstrucción (ver Gallerani et al., 2011).

Para ahondar en la modelización de pérdidas económicas se sugiere recurrir a Gerl et al. (2016) y/o a Fuchs et al. (2019b).

2.6. Análisis de vulnerabilidad estructural por riesgo de inundación

Para evaluar la respuesta estructural ante el riesgo de inundaciones bajo diferentes escenarios hidrodinámicos, se empleó la metodología de simulación de escenarios repetitivos en el software Iber (Mazzorana et al., 2023). Se modelaron caudales entre 700 y 900 m³/s, incluyendo transporte de madera y sedimentos, considerando una influencia de marea de 0.1 m. Para reflejar las condiciones de deposición de sedimentos en la zona baja de la cuenca con influencia de marea, se modificó el modelo digital de elevación (DEM), aumentando en 1 m la altitud de las curvas de nivel correspondientes y generando un nuevo DEM. Entre los escenarios simulados, se seleccionó el que resultó con mayor extensión de inundación, correspondiendo a un caudal de 900 m³/s con un transporte de 2095 troncos y un 50% adicional (1048 troncos) ingresados como caudal sólido inicial.

En base a los resultados hidrodinámicos obtenidos en la simulación (calado y velocidad), se analizó la vulnerabilidad de las viviendas dentro del área afectada por la inundación. Se identificaron tres viviendas con los mayores valores de calado para llevar a cabo un análisis detallado. Cada vivienda fue representada a través de fotointerpretación, utilizando datos obtenidos por Google Satélite y levantamiento Aero fotogramétrico en la zona de estudio, que permitieron medir las dimensiones bidimensionales (largo y ancho). Complementariamente, se emplearon imágenes de Street View para identificar las viviendas y características estructurales, como el tipo de techo, paredes externas y presencia de cimientos. Se estimaron las dimensiones restantes para cada vivienda, por medio de una proporción entre las magnitudes de las dimensiones observadas en las imágenes y las obtenidas por fotointerpretación para cada vivienda. Debido a las limitaciones en la precisión de estas medidas, los valores obtenidos se consideran aproximados.

El análisis de las variables hidrodinámicas permitió calcular las velocidades incidentes (normal) sobre las paredes de las viviendas seleccionadas. Estas velocidades se determinaron a partir de los vectores de velocidad en las direcciones x e y, donde la magnitud se calculó considerando los componentes vectoriales de la velocidad en las direcciones y el ángulo de incidencia respecto a la orientación de cada pared. Cada vivienda fue modelada como una estructura con cuatro paredes orientadas en las direcciones cardinales: pared 1 hacia el este, pared 2 hacia el norte, pared 3 hacia el oeste y pared 4 hacia el sur.

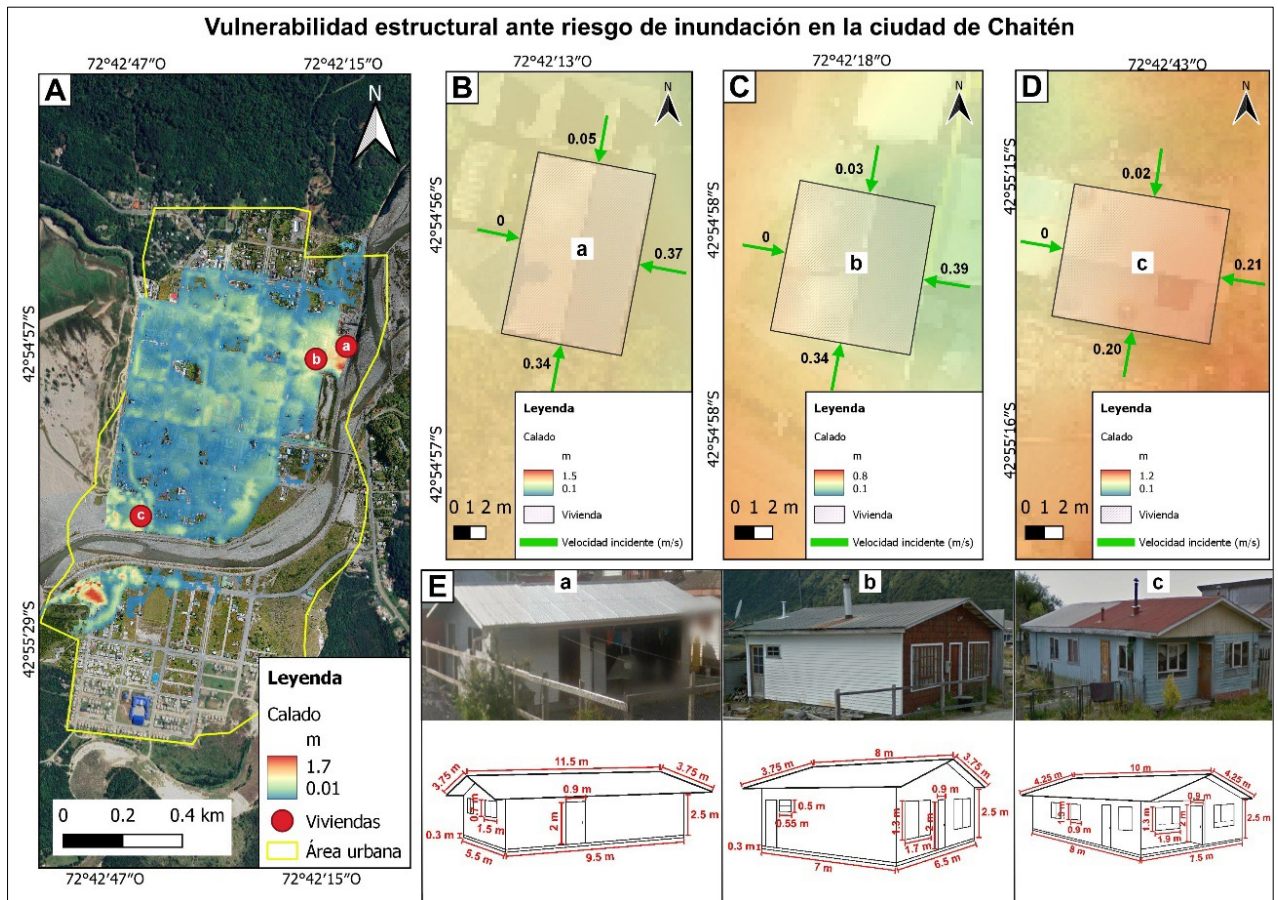
Para evaluar la estabilidad estructural, se identificaron los materiales predominantes en las viviendas: zinc para los techos, madera para las paredes y hormigón armado para los cimientos. Con esta información, se calculó el peso total de cada vivienda, incluyendo el peso del techo, paredes externas e internas (estas últimas asumidas como el 50% del peso de las externas), objetos internos (30% del peso de las paredes externas) y cimientos.

A continuación, se calcularon las fuerzas hidrodinámicas, hidrostáticas y de empuje de suelo que actuaban sobre cada pared de las viviendas. Estas fuerzas se utilizaron para estimar los momentos generados y, finalmente, determinar los factores de seguridad ante deslizamiento y volcamiento. Este análisis permitió identificar escenarios críticos de vulnerabilidad estructural, señalando aquellas viviendas que presentan mayor riesgo de daño bajo las condiciones de inundación simuladas.

3. Resultados

El modelo de inundación abarcó una extensa área residencial de Chaitén, identificando las zonas inundadas y áreas afectadas con cada vivienda en términos de calado y velocidades incidentes (Figura 9). El transporte de madera como caudal sólido jugó un papel clave en la dinámica de la inundación, acentuando el impacto sobre el entorno construido.

Figura 9. Mapa de inundación de la ciudad de Chaitén. El panel A corresponde al área urbana de Chaitén y la extensión de la inundación en relación a su calado y las edificaciones tipo a, b y c presentes; Panel B corresponde a la vivienda tipo a en relación a su calado y velocidad incidente (normal) a las paredes; Panel C corresponde a la vivienda tipo b en relación a su calado y velocidad incidente a las paredes; Panel D corresponde a la vivienda tipo c en relación a su calado y velocidad incidente a las paredes; Panel E expone las dimensiones de las viviendas tipo a, b y c.



Fuente: Elaboración propia.

En particular, las paredes orientadas hacia el oeste (paredes "3") no presentaron incidencia de velocidad, dado que el flujo en esa dirección es nulo al ser opuesto a la dirección del flujo principal. Por consiguiente, no se consideraron impactos hidrodinámicos sobre las paredes 3 de las viviendas analizadas (Tabla 3). Además, en las paredes orientadas hacia el este (paredes "1") presentaron mayor magnitud de la velocidad incidente.

Tabla 3. Para cada pared de las viviendas tipo a, b y c, se registró el calado máximo (D_{F1}) y las velocidades en las direcciones x (V_x) e y (V_y). Se estimó el ángulo (θ) de incidencia de la velocidad incidente respecto a la pared, y la magnitud de dicha velocidad.

Viviendas	Paredes	D_{F1} (m)	V_x (m/s)	V_y (m/s)	θ (°)	V (m/s)
a	1	0,85	-0,35	0,3	12,00	0,37
	2	0,85	-0,25	0,35	10,60	0,05
	3	0,80	-0,25	0,35	11,50	0
	4	0,90	-0,35	0,35	10,00	0,34
b	1	0,65	-0,3	0,35	9,57	0,39
	2	0,50	-0,15	0,1	10,95	0,03
	3	0,60	-0,25	0,2	11,07	0
	4	0,65	-0,35	0,35	9,87	0,34
c	1	0,90	-0,05	0,2	9,24	0,21
	2	0,85	-0,1	0,2	9,87	0,02
	3	0,70	-0,1	0,2	9,24	0
	4	0,90	-0,1	0,2	9,87	0,20

Fuente: Elaboración propia.

A partir de las dimensiones de cada vivienda (Anexo 1) y sus características respecto al material de construcción (Anexo 2), se calculó el peso para cada vivienda, además del peso del agua desplazado por cada estructura, y su respectivo peso neto (Anexo 3). Se calcularon las fuerzas de cargas hidrodinámicas, hidrostáticas y de empuje de suelo para cada pared de cada vivienda (Anexo 4). Posteriormente, se calcularon los momentos respectivos para cada pared de cada vivienda (Anexo 5). Los resultados mostraron que las fuerzas hidrodinámicas predominan en las paredes expuestas al flujo directo, mientras que las fuerzas hidrostáticas y de empuje de suelo aportan al balance general de estabilidad.

A partir de los valores resultantes de las fuerzas de carga y momentos, se estimaron los factores de seguridad para las viviendas en relación al ancho y largo de cada vivienda (Tabla 4). En particular, la vivienda tipo a presentó valores mínimos para $FS_{(OT)}$ de 0,63 y $FS_{(SL)}$ de 2,75, la vivienda tipo b mostró los valores mínimos para $FS_{(OT)}$ de 0,58 y $FS_{(SL)}$ de 2,59, y la vivienda tipo c resultó con valores mínimos para $FS_{(OT)}$ de 0,53 y $FS_{(SL)}$ de 2,21, ante condiciones de mayor carga hidrodinámica.

Tabla 4. Chequeo de estabilidad de la estructura frente al volcamiento ($FS_{(OT)}$) y deslizamiento ($FS_{(SL)}$), considerando el brazo de distancia (b) el largo y ancho de cada casa.

Viviendas	b	$FS_{(OT)}$	$FS_{(SL)}$
a	Largo	0,63	2,75
	Ancho	0,66	3,02
b	Largo	0,60	2,70
	Ancho	0,58	2,59
c	Largo	0,53	2,21
	Ancho	0,56	2,33

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Los recientes avances en los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de edificaciones residenciales frente a peligros hidráulicos en ríos de montaña marcan un progreso significativo desde perspectivas tanto metodológicas como prácticas. Estos métodos, ya sean indicadores, basados en matrices o curvas, han destacado en el establecimiento de asociaciones cuantitativas entre diversas variables geométricas y estructurales que caracterizan los objetos expuestos (Papathoma-Köhle et al., 2019). Además, han capturado parcialmente las intensidades de los procesos impactantes y vinculado estos factores con el grado esperado de pérdidas económicas (Papathoma-Köhle et al., 2017 y 2019). A pesar de estos avances, una limitación crucial radica en el desafío inherente de estos enfoques para proporcionar una identificación racional y directa de los mecanismos subyacentes generadores de daño. Las complejidades de cómo interactúan los procesos con la estructura expuesta y su entorno, junto con las respuestas de la estructura a los impactos, siguen siendo esquivas dentro de las metodologías actuales. La dependencia de un enfoque inductivo presenta dificultades, especialmente al enfrentar escenarios no contemplados en las bases de datos subyacentes. En respuesta a estas limitaciones, en este trabajo abogamos por un punto de vista alternativo centrado en capturar los mecanismos generadores de daño a través de un procedimiento estructurado basado en primeros principios (Suda & Rudolf-Miklau, 2012; Autor et al., 2014; Milanesi et al., 2018). Argumentamos que este enfoque es esencial para obtener conocimientos cruciales para diseñar soluciones funcionales capaces de mitigar efectivamente los efectos adversos (Autor & Maturana, 2023). Al intervenir correctamente en los aspectos clave tanto de la generación de impacto como de las respuestas estructurales, se puede lograr una comprensión más completa de las vulnerabilidades en juego. Para abordar esta brecha, en este trabajo proponemos una hoja de ruta metodológica que integra pasos de modelado cualitativo y cuantitativo para la evaluación de procesos, impactos y respuestas. Esta hoja de ruta no solo se basa en el estado del arte del conocimiento de los peligros naturales y las ciencias de la ingeniería asociadas, sino que también fomenta una valiosa colaboración interdisciplinaria. Esta integración permite una exploración más acabada de los factores que determinan la respuesta estructural, reconociendo la compleja interacción entre los procesos naturales y el entorno construido (Autor et al., 2019). Una segunda razón convincente para adoptar esta propuesta de hoja de ruta metodológica es que requiere explícitamente un análisis tanto de los procesos, impactos y respuestas en escenarios complejos. Esto incluye situaciones que involucran cascadas de procesos

y mecanismos distintivos generadores de daño asociados a edificaciones residenciales con características específicas (Bertin, 2022). La adaptabilidad y amplitud del marco metodológico lo posicionan como un enfoque prometedor para avanzar en nuestra comprensión de la vulnerabilidad estructural o física y diseñar estrategias de mitigación más efectivas. Por las razones mencionadas anteriormente, la propuesta de hoja de ruta metodológica es particularmente relevante para el contexto chileno debido a varias consideraciones clave que se detallan a continuación.

Ocurrencia de Cascadas de Procesos de Peligros Naturales Complejos: Chile, al encontrarse en una región sísmica y volcánicamente activa con características geográficas diversas, está propenso a cascadas de procesos de peligros naturales complejos. Estas cascadas involucran una combinación de eventos sísmicos, volcánicos y también deslizamientos de tierra e inundaciones. El énfasis de la propuesta de hoja de ruta metodológica en analizar tanto impactos como respuestas en escenarios complejos se alinea bien con la naturaleza multifacética de los peligros naturales en Chile. Un caso ejemplar es la localidad de Chaitén ha enfrentado cascadas de procesos de peligros naturales complejos (Iroumé et al., 2015; Tonon et al., 2017; Iroumé et al., 2020; Basso-Báez et al., 2020). Esta ciudad ha sido fuertemente afectada por una concatenación de diversos procesos de origen natural, como la erupción volcánica entre los años 2008 - 2009, donde, debido a de la gran cantidad de material piroclástico expulsado, sumado a la madera de gran tamaño transportada aguas abajo por el río Blanco durante una crecida, la ciudad de Chaitén fue completamente inundada producto del desborde y avulsión del cauce. La población tuvo que evacuar y trasladarse a otras zonas de la región debido a la destrucción de la ciudad (Arteaga & Ugarte, 2015). Esta secuencia de eventos demostró la interconexión de diversos procesos naturales, subrayando la importancia de comprender la complejidad de las cascadas de peligros (Basso-Báez et al., 2020). El evento ha dejado séquelas tanto ecológicas, morfológicas e hidráulicas como socioeconómicas.

Características Estructurales y de Materiales Únicas: Las edificaciones residenciales en Chile exhiben características estructurales y de materiales específicas que difieren de aquellas en otras regiones montañosas afectadas por peligros torrenciales. Estas diferencias se atribuyen a los tipos de materiales comúnmente utilizados. Una edificación residencial chilena en áreas rurales es esencialmente una estructura liviana propensa a ser arrastrada o destruida por los impactos generados por flujos bifásicos. De hecho, un número relevante de edificaciones residenciales en Chaitén reflejan las características estructurales y de materiales únicas mencionadas. La ligereza de las estructuras, común en áreas rurales de Chile, contribuyó a que flujos bifásicos generados por la erupción afectaran gravemente las viviendas, algunas de las cuales fueron arrastradas por lahares hasta el recién formado delta fluvial (Bertin, 2022).

La ciudad de Chaitén se encuentra expuesta a múltiples peligros naturales, y demuestra cómo la interacción de estos puede desencadenar cascadas de procesos complejas. La aplicación de la hoja de ruta metodológica propuesta no solo permite comprender estas dinámicas, sino también diseñar estrategias de mitigación más efectivas, como la planificación de asentamientos, el fortalecimiento de infraestructuras críticas y la educación comunitaria, contribuyendo a reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia frente a eventos naturales adversos.

En cuanto a los resultados obtenidos de las simulaciones en Iber, se destaca el papel crítico del transporte de madera como caudal sólido en la dinámica de la inundación, amplificando el impacto sobre las estructuras. La incidencia de velocidades, concentrada en las paredes orientadas hacia el este y ausente en las orientadas al oeste, destaca la importancia de la orientación estructural para evaluar riesgos y planificar medidas de mitigación en zonas vulnerables.

En cuanto a los factores de seguridad, las diferencias entre las viviendas tipo a, b y c revelan que las condiciones hidrodinámicas extremas afectan de manera desproporcionada a las estructuras menos robustas. Los valores mínimos de $FS_{(OT)}$ en la vivienda tipo c (0,53) reflejan su alta vulnerabilidad al volcamiento, mientras que los $FS_{(II)}$ más bajos (2,21) indican una mayor estabilidad relativa frente al deslizamiento. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de considerar las características estructurales en estrategias de mitigación y reforzamiento.

La metodología propuesta entrelaza los aspectos a considerar en la modelización cualitativa y cuantitativa de los procesos fluviales, de los impactos y las respuestas de las viviendas expuestas a flujos multifásicos. Entender la concatenación entre procesos, impactos y respuestas es primordial para prospectar como diseñar estrategias que apunten a la mitigación de los efectos dañinos con un enfoque funcional a la eliminación de las causas.

Estructurando el conocimiento de esta forma, es decir, considerando los elementos cualitativos y cuantitativos, es posible lograr una mitigación eficaz a través de la intervención en los patrones de propagación de los procesos de amenaza, en la calidad del diseño y de la materialidad del entorno construido, en una planificación del territorio de nivel más alto o en una combinación de estos factores.

Por lo tanto, es necesario progresar por un lado planificando las soluciones según el tipo proceso y sus características dinámicas y por el otro innovando la manera de construir para que las estructuras sean resilientes a los impactos (Autor & Maturana, 2023).

Planificar el entorno construido, rediseñándolo para que sea protegido también ante escenarios de cambio climático desfavorables es una tarea de gran relevancia en Chile, debido a que es uno de los países más afectados por los cambios generales en las condiciones climáticas, como aumento en la temperatura y modificaciones en el patrón de las precipitaciones, asociados a largos periodos de sequías e intensas precipitaciones en cortos periodos de tiempo (Viale et al., 2018; Garreaud et al., 2020; Fernández & Gironás, 2021), así como en la formación y vaciamiento de lagos proglaciares en zonas montañosas (Rojas, et al., 2014; Iribarren Anacona et al., 2015).

Reflexionando acerca de los procesos de planificación territorial y de diseño infraestructural, sugerimos emplear las herramientas propuestas en este trabajo tempranamente en los procesos mencionados para mejorar la búsqueda de soluciones tanto funcionalmente validas y técnicamente factibles como económicamente eficientes. Fortalecer el vínculo entre la física y la economía del riesgo puede respaldar una priorización racional de los flujos de inversión públicos y privados para la mitigación del riesgo de inundaciones.

5. Conclusiones

Los resultados de este estudio evidencian la relevancia de integrar el análisis del riesgo de inundación y la evaluación de la vulnerabilidad estructural para entender los desafíos específicos que enfrentan comunidades expuestas, como Chaitén. La identificación de áreas críticas de inundación y el análisis de las fuerzas hidrodinámicas incidentes sobre las viviendas permitieron evaluar su estabilidad frente a deslizamiento y volcamiento.

Chile, como muchos otros países de América Latina, es un país que históricamente ha estado expuesto a diferentes amenazas de origen natural, pero su enfoque sistemático en la mitigación del riesgo es bastante reciente.

Las políticas para la reducción del riesgo de desastres subrayan claramente la preocupación que el tema genera. Los instrumentos de planificación territorial, en particular aquellos que tienen un carácter normativo, son herramientas útiles para crear condiciones favorables para que se desarrollen iniciativas de adaptación. Sin embargo, la calidad y el alcance de nuestro conocimiento de como los procesos interactúan con el entorno construido nos permitirán proponer estrategias de adaptación eficaces. La metodología propuesta en este trabajo aporta específicamente a esta necesidad primordial.

Estas conclusiones aportan una base para diseñar estrategias de mitigación más efectivas y para orientar políticas de planificación territorial que promuevan la resiliencia frente a eventos extremos.

Bibliografía

- Alfieri, L., Cohen, S., Galantowicz, J., Schumann, G. J., Trigg, M. A., Zsoter, E., Prudhomme, C., Kruczkiewicz, A., de Perez, C. E., Flamig, Z., Rudari, R., Wu, H., Adler, R.F., Brakenridge, R.G., Kettner, A., Weerts, A., Matgen, P., Islam, S.A.K.M., de Groeve, T., Salamon, P. (2018). A global network for operational flood risk reduction. *Environmental Science & Policy*, 84, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.03.014>.
- Arteaga, C., & Ugarte, A. M. (2015). Identidades en emergencia: la otra cara de la reconstrucción. El caso de Chaitén. *Magallania (Punta Arenas)*, 43(3), 107-123.
- Attems, M-S, Thaler, T, Genovese, E, Fuchs, S. (2020). Implementation of property-level flood risk adaptation (PLFRA) measures: Choices and decisions. *WIREs Water*, 7, e1404. <https://doi.org/10.1002/wat2.1404>
- Baltar, F., Gorjup, M.T. (2012). Muestreo mixto online: una aplicación en poblaciones ocultas. "Intangible Capital", 8, 123-149. <http://hdl.handle.net/2099/12244>.
- 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>.
- Beer, F.P., Johnston, E.R., DeWolf, J.T., Mazurek, D.F. (2017). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Education. Ciudad de México.
- Bertin Salazar, C.A.E. (2022). Análisis de riesgo específico de inundación de la ciudad de Chaitén, bajo un escenario de crecida extrema del río Blanco, post erupción. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias. Escuela de Geografía, pp. 90. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2022/fcb544a/doc/fcb544a.pdf>.
- 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>
- Brunetti, M. T., S. Peruccacci, M. Rossi, S. Luciani, D. Valigi, Guzzetti, F. (2010). Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 447-458, <https://doi.org/10.5194/nhess-10-447-2010>.
- Dankers, R., & Feyen, L. (2008). Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D19).
- De Groeve, T., Thielen-del Pozo, J., Brakenridge, R., Adler, R., Alfieri, L., Kull, D., Lindsay, F., Imperiali, O., Pappenberger, F., Rudari, R., Salamon, P., N. Villars, N., Wyjad, K. (2015). Joining forces in a global flood partnership. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(5), ES97-ES100. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00147.1>.
- Fernández, B., Gironás, J. (2021). *Water Resources of Chile*. 433 pp. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56901-3>. FEMA-P-259. (2012). *Engineering Principles and Practices for Retrofitting Flood-Prone Residential Structures (Third Edition)*. FEMA.

- Früh-Müller, A., Wegmann, M. & Koellner, T. Flood exposure and settlement expansion since pre-industrial times in 1850 until 2011 in north Bavaria, Germany. *Regional Environmental Change*, 15, 183–193 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0633-9>.
- Fuchs, S., Keiler, M., Ortlepp, R., Schinke, R., & Papathoma-Köhle, M. (2019a). Recent advances in vulnerability assessment for the built environment exposed to torrential hazards: Challenges and the way forward. *Journal of Hydrology*, 575, 587-595. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.067>.
- Fuchs, S., Heiser, M., Schlögl, M., Zischg, A., Papathoma-Köhle, M., Keiler, M. (2019b). Short communication: A model to predict flood loss in mountain areas, *Environmental Modelling & Software*, 117, 2019, 176-180, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.03.026>.
- Gallerani, V.; Viaggi, D.; Zanni, G. (2011). *Manuale di Estimo*; McGraw-Hill: Milano, Italy.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The central Chile mega drought (2010–2018): a climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421-439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>.
- Gerl, T., Kreibich, H., Franco, G., Marechal, D., Schröter, K. (2016). A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking. *PLoS ONE* 11(7): e0159791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159791>.
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature climate change*, 3(9), 816-821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>.
- Holub, M., Suda, J., Fuchs, S. (2012). Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design. *Environmental Earth Sciences*, 66(7), 1853- 1870. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1410-4>.
- Hu, K. H., Cui, P., and Zhang, J. Q. (2012). Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 2209–2217, <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2209-2012>.
- Iribarren-Anacona, P., Mackintosh, A., Norton, K.P. (2015). Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 2–21. <https://doi.org/10.1002/esp.3524>.
- Iroumé, A., Mao, L., Andreoli, A., Ulloa, H., Ardiles, &, & P, M. (2015). Large wood mobility processes in low-order Chilean river channels. *Geomorphology*, 228, 681-693, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.025>.
- Iroumé, A., Paredes, A., Garbarino, M., Morresi, D., & Batalla, R. J. (2020). Post-eruption morphological evolution and vegetation dynamics of the Blanco River, southern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102809, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102809>.
- Kolymbas, D. (2022). *A Primer in Soil Mechanics*. 188 pp. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009210348>
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L.M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G.R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K, Shershtukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>.
- Lagos, M., Hidalgo, R., & Arenas-Vásquez, F. (2010). Los riesgos naturales en la planificación territorial. *Centro de Políticas Públicas UC*, N° 39.
- Liu, X., Wang, F., Nawnit, K. et al. (2020). Experimental study on debris flow initiation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, 1565– 1580. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01618-8>
- Mazzoleni, M., Mård, J., Rusca, M., Odongo, V., Lindersson, S., & Di Baldassarre, G. (2021). Floodplains in the Anthropocene: A Global Analysis of the Interplay Between Human Population, Built Environment, and Flood Severity. *Water Resources Research*, 57(2), e2020WR027744. <https://doi.org/10.1029/2020WR027744>.
- Mazzorana, B., Maturana, F. (2023). Mitigating Complex Flood Risks in Southern Chile in a Particular Spatial Planning Context: Towards a Sustainable Strategy. En Oyarzún, C., Mazzorana, B., Iribarren Anacona, P., Iroumé, A. (Eds.) (2023). *Rivers of Southern Chile and Patagonia. The Latin American Studies Book Series*. Springer, 192-233. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26647-8_10.
- Mazzorana, B., Bahamondes, D., Montecinos, L., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, I. (2023). Explorando la respuesta hidrodinámica de un río altamente perturbado por erupciones volcánicas: el Río Blanco, Chaitén (Chile). *Ingeniería del Agua*, 27(2), 73-92. <https://doi.org/10.4995/ia.2023.18866>
- Mazzorana, B. (2020). Hacia un marco conceptual y gestión participativa de los riesgos. En Bosdorf, A., Marchant, C., Sanchez, R. (2020). *Chile cambiando. Revisitando la geografía regional de Wolfgang Weischet*. 357-374.

- Mazzorana, B., Picco, L., Rainato, R., Iroumé, A., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, C., Valdebenito, G., Iribarren-Anacona, P., 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. [10.1016/j.scitotenv.2018.11.217](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.217)
- Mazzorana, B., Simoni, S., Scherer, C., Gems, B., Fuchs, S., & Keiler, M. (2014). A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3817-3836. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3817-2014>.
- Mazzorana, B., Levaggi, L., Keiler, M., & Fuchs, S. (2012a). Towards dynamics in flood risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(11), 3571-3587. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3571-2012>.
- Mazzorana, B., Comiti, F., Scherer, C., & Fuchs, S. (2012b). Developing consistent scenarios to assess flood hazards in mountain streams. *Journal of environmental management*, 94(1), 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.030>.
- Milanesi L, Pilotti M, Belleri A, Marini A, Fuchs S. (2018) Vulnerability to flash floods: a simplified structural model for masonry buildings. *Water Resources research*, 54, 7177–7197. doi: 10.1029/2018WR022577.
- Papathoma-Köhle M., Gems B., Sturm M., Fuchs S. (2017). Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows, *Earth-Science Reviews*, 171, 272 – 288. doi: 10.1016/j.earsci-rev.2017.06.007
- Papathoma-Köhle M, Cristofari G, Wenk M, Fuchs S. (2019) The importance of indicator weights for vulnerability indices and implications for decision making in disaster management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 1–12. doi: 10.1016/j.ijdr.2019.101103.
- Pesaresi, M., Melchiorri, M., Siragusa, A., & Kemper, T. (2017). Atlas of the human planet 2016. Mapping human presence on earth with the global human settlement layer. EUR 28116 EN; doi:10.2788/582834.
- Ran, J., & Nedovic-Budic, Z. (2016). Integrating spatial planning and flood risk management: A new conceptual framework for the spatially integrated policy infrastructure. *Computers, Environment and Urban Systems*, 57, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.01.008>.
- Rigon, R., D'Odorico, P., Bertoldi, G. (2011). The geomorphic structure of the runoff peak. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1853–1863. doi:10.5194/hess-15-1853-2011.
- 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>.
- Scholz, R. W., & Tietje, O. (2002). *Embedded case study methods: Integrating quantitative and qualitative knowledge*. Sage.
- Suda, J., & Rudolf-Miklau, F. (Eds.). (2012). *Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz*. Springer-Verlag.
- Tonon, A., Iroumé, A., Picco, L., Oss-Cazzador, D., & Lenzi, M. (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, <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.03.025>.
- Viale, M., Valenzuela, R., Garreaud, R. D., & Ralph, F. M. (2018). Impacts of atmospheric rivers on precipitation in southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 19(10), 1671-1687.
- Williams, R.D., Bangen, S., Gillies, E., Kramer, N., Moir, H., Wheaton, J. (2020). Let the river erode! Enabling lateral migration increases geomorphic unit diversity, *Science of The Total Environment*, 715, 136817, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136817>.

Anexos

Anexo 1. Dimensiones del techo, pared, espesor pared y altura del cimiento para las viviendas tipo a, b y c.

Dimensiones	a	b	c
Ancho techo (m)	7,5	7,5	8,5
Largo techo (m)	11,5	8	10
Altura techo (m)	1	1	1
Ancho pared (m)	5,5	6,5	7,5
Largo pared (m)	9,5	7	8
Altura pared (m)	2,5	2,5	2,5
Espesor pared (m)	0,2	0,2	0,2
Cimiento (m)	0,3	0,3	0,2

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Densidad y peso de materiales identificados en la edificación de las viviendas tipo a, b y c.

Material	Valor
Madera	600 kg/m ³
Zinc	4,5 kg/m ²
Hormigón	2400 kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Estimación de peso para cada vivienda ($W_{KLKLMNOP}$), peso del agua desplazado por cada vivienda (W_{PQRF}), y peso neto (W_{NMST}).

Viviendas	$W_{vivienda}$ (N)	W_{agua} (N)	W_{neto} (N)
a	1 242 649	435 686,6	806 962,6
b	1 007 481	307 543,5	699 938
c	1 165 163	429 279,5	735 883,1

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Estimación de fuerzas de impacto para cada vivienda y pared, estimando fuerzas hidrostáticas ($F_{U,U}$), hidrostática de supresión en la base ($F_{V,P}$ y $F_{V,W}$), hidrodinámicas ($F_{X,U}$), empuje activo ($F_{Y,U}$) y empuje pasivo ($F_{Y,X}$).

Viviendas	Paredes	$F_{1,1a}$ (N)	$F_{1,1b}$ (N)	$F_{1,1c}$ (N)	$F_{5,a}$ (N)	$F_{5,b}$ (N)	$F_{2,1}$ (N)	$F_{3,1}$ (N)	$F_{3,2}$ (N)
a	1	8859,7	6253,9	1103,6	544 215,1	10 465,7	142,5	306,2	4170,3
	2	8859,7	6253,9	1103,6	586 077,8	10 465,7	2,2	306,2	4170,3
	3	7848,0	5886,0	1103,6	481 421,1	31 397,0	0	306,2	4170,3
	4	9932,6	6621,8	1103,6	418 627,0	83 725,4	133,7	306,2	4170,3
b	1	5180,9	4782,4	1103,6	481 421,1	10 465,7	126,8	481,9	306,2
	2	3065,6	3678,8	1103,6	418 627,0	31 397,0	0,5	481,9	306,2
	3	4414,5	4414,5	1103,6	460 489,7	10 465,7	0	481,9	306,2
	4	5180,9	4782,4	1103,6	481 421,1	31 397,0	96,6	481,9	306,2
c	1	9932,6	6621,8	1103,6	586 077,8	41 862,7	47,5	481,9	306,2
	2	8859,7	6253,9	1103,6	565 146,5	10 465,7	0,3	481,9	306,2
	3	6008,6	5150,3	1103,6	502 352,4	41 862,7	0	481,9	306,2
	4	9932,6	6621,8	1103,6	586 077,8	10 465,7	43,7	481,9	306,2

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Estimación de momentos para cada fuerza de impacto estimado para cada casa y pared. Momento de fuerzas hidrostáticas ($M F_{U,U}$), momento de fuerza hidrostática de supresión en la base ($M F_{VP}$ y $M F_{VW}$), momento de fuerza hidrodinámica ($M F_{X,U}$), momento de empuje activo ($M F_{Y,U}$) y momento de empuje pasivo ($M F_{Y,X}$).

Viviendas	Paredes	$M F_{1,1a}$ (Nm)	$M F_{1,1b}$ (Nm)	$M F_{1,1c}$ (Nm)	$M F_{5a}$ (Nm)	$M F_{5b}$ (Nm)	$M F_{2,1}$ (Nm)	$M F_{3,1}$ (Nm)	$M F_{3,2}$ (Nm)
a	1	5168,1	938,1	110,4	1 496 591,7	38 374,1	103,3	30,6	417,0
	2	5168,1	938,1	110,4	1 611 714,1	38 374,1	1,6	30,6	417,0
	3	4447,2	882,9	110,4	1 323 908,0	115 122,4	0	30,6	417,0
	4	5959,6	993,3	110,4	1 151 224,3	306 993,2	100,2	30,6	417,0
b	1	2676,8	717,4	110,4	1 323 908,0	38 374,1	79,2	48,2	30,6
	2	1430,6	551,8	110,4	1 151 224,3	115 122,4	0,3	48,2	30,6
	3	2207,3	662,2	110,4	1 266 346,8	38 374,1	0	48,2	30,6
	4	2676,8	717,4	110,4	1 323 908,0	115 122,4	60,4	48,2	30,6
c	1	5959,6	993,3	110,4	1 611 714,1	153 496,6	35,6	48,2	30,6
	2	5168,1	938,1	110,4	1 554 152,9	38 374,1	0,2	48,2	30,6
	3	3204,6	772,5	110,4	1 381 469,2	153 496,6	0	48,2	30,6
	4	5959,6	993,3	110,4	1 611 714,1	38 374,1	32,8	48,2	30,6

Fuente: Elaboración propia.

Agradecimientos

La investigación fue financiada por el proyecto ANID/CONICYT 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)”, liderado por Bruno Mazzorana.

Contribución de autorías

BM: Concepción, supervisión, formulación, aportes analíticos, escritura y revisión

JR: Formulación y escritura, confección y edición material gráfico, aportes analíticos

YC: confección y edición material gráfico, aportes analíticos, escritura

AG: confección y edición material gráfico, aportes analíticos, escritura

IR: aportes analíticos, escritura

DB: aportes analíticos, escritura

RH: aportes analíticos, escritura

Financiación

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto ANID/Fondecyt Regular 1200091 “Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT)”.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses a declarar.