



Universidad Austral de Chile

Conocimiento y Naturaleza

**Análisis de riesgo específico de inundación de la ciudad
de Chaitén, bajo un escenario de crecida extrema del río
Blanco, post erupción**

Trabajo de Titulación presentado a la Escuela de Geografía de la Universidad
Austral de Chile en cumplimiento de los requisitos para optar al Título
Profesional de Geógrafa

Carolina Alejandra Estrella Bertin Salazar

Profesor guía: Dr. Bruno Mazzorana

Valdivia, 2022

Comisión evaluadora:

Bruno Mazzorana - Patrocinante

Pablo Iribarren – Co-Patrocinante

Gonzalo Durán - Informante

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, a mis padres Ana y Josué y a mi hermana Belén, por el apoyo brindado durante toda mi vida. Les agradezco infinito por alentarme a confiar y creer en cada una de mis capacidades. Gracias a mis ángeles guardianes, Mami, Tata y Carlos, quienes me acompañan desde otro plano en cada etapa de mi vida y me dan la fuerza para enfrentar cualquier adversidad. Los amo mucho a cada uno de ustedes, por ser mis pilares y ejemplos a seguir.

También, agradezco a mi amiga Ary por acompañarme durante estos años, por brindarme su apoyo cuando más lo necesité, en especial, por salvarme en uno de los años más caóticos con sus resúmenes y materia. Gracias a mi amiga Ana y Karlita por formar parte de mi vida.

Gracias a mi profesor patrocinante Dr. Bruno Mazzorana por permitirme participar en este proyecto y poder enriquecerme del conocimiento de cada una de las personas que trabajan en él, por su tiempo invertido, dedicación y cada una de sus sugerencias. A Gonzalo Durán, por ayudarme y guiarme desde el inicio de este trabajo de investigación y por su paciencia. De igual forma, al profesor Pablo Iribarren por su disposición para cualquier consulta o revisión de este escrito. También, quiero destacar el apoyo brindado por Diego Bahamondes durante la última etapa, gracias por cada una de tus sugerencias y opiniones.

Por último, agradezco al proyecto **FONDECYT N° 1200091: “Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT)”**, coordinado por el investigador responsable Bruno Mazzorana y a cada uno de sus investigadores que me ayudaron durante este proceso.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
3. OBJETIVOS.....	15
3.1. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	15
3.2. OBJETIVO GENERAL	15
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3.4. ÁREA DE ESTUDIO.....	16
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1. RIESGO DE DESASTRES.....	20
4.1.1. AMENAZA	21
4.1.1. EXPOSICIÓN.....	22
4.1.2. VULNERABILIDAD	23
4.1.2.1 VULNERABILIDAD FÍSICA ESTRUCTURAL	23
4.1.3. VALOR DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS	25
4.2. TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE CHAITÉN.....	25
4.3. RIESGO DE INUNDACIONES	28
4.4. CARTOGRAFÍAS DE RIESGO	29
4.5. ESCENARIO DE INUNDACIÓN DE LA CIUDAD DE CHAITÉN	31
4.5.1. INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA.....	31
4.5.2. SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA- CON HERRAMIENTA IBER	31
5. METODOLOGIA.....	33
5.1. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO.....	33
5.2. SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA.....	35
5.2.1. CONDICIONES INICIALES.....	35
5.2.2. CONDICIONES DE CONTORNO Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN	37
5.3. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS VIVIENDAS	39
5.3.1. PONDERACIÓN DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD FÍSICA A PARTIR DEL MÉTODO AHP	40
5.3.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS VIVIENDAS	41

5.3.3.	MODELO DE PROCESO	43
5.3.3.1.	CUANTIFICACIÓN DE IMPACTO.....	45
5.3.4.	ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDAD FÍSICA	45
5.4.	DAÑO ESPERADO PARA UN ESCENARIO ESPECÍFICO DE RIESGO POR INUNDACIONES.....	46
6.	RESULTADOS.....	49
6.1.	EXPOSICIÓN DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE CHAITÉN	49
6.2.	EVALUACIÓN VULNERABILIDAD FÍSICA DE LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES.....	52
6.2.1.	PONDERACIÓN DE LOS INDICADORES DE VULNERABILIDAD FÍSICA MEDIANTE AHP	53
6.2.2.	SUSCEPTIBILIDAD DE LAS VIVIENDAS	54
6.2.3.	MODELO DE PROCESO	56
6.2.3.1.	IMPACTO	57
6.2.3.2.	CAMBIO MORFOLÓGICO.....	60
6.2.4.	ÍNDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA	61
6.3.	DAÑO ESPERADO PARA UN ESCENARIO ESPECÍFICO DE RIESGO POR INUNDACIONES.....	64
7.	DISCUSIÓN.....	66
8.	CONCLUSIONES.....	73
9.	REFERENCIAS	74
10.	ANEXOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Cartografía Área de estudio: Zona urbana de Chaitén y río Blanco	16
Figura 2.	Imágenes de daños causados por inundaciones y sedimentación en la localidad de Chaitén. A) Extensa acumulación de sedimentos y avulsión de Chaitén Blanco, b) Vivienda enterrada por sedimentos depositados sobre la orilla en la terraza, C) Vista previa a la erupción del río Blanco mirando aguas arriba (norte) desde el puente "Carretera Austral" en la localidad, D) Vista de post erupción desde la misma ubicación.....	18
Figura 3.	Mapa de defensas fluviales construidas en Chaitén	19
Figura 4.	Vivienda de arquitectura chilota. Nótese la confección con tejuelas y la delimitación perimetral de madera	26
Figura 5.	Vivienda de arquitectura con influencia externa a la ciudad. Se visualiza la incorporación de planchas de zinc en las fachadas.....	27

Figura 6. Mapa de riesgo de inundación: Distribución del daño en €/m ² esperado para la inundación.....	30
Figura 7. A) Modelo de GPS de la marca EMLID. B) Puntos de control en tierra. C) Investigadores adquiriendo datos de puntos de control en tierra	34
Figura 8. Mapa de Chaitén, que muestra las zonas de vuelo que se realizaron y los distintos puntos de Control utilizados en la Reconstrucción fotogramétrica	34
Figura 9. Aumento en el nivel del lecho del río. A la derecha se encuentra una imagen aérea con la posición de los perfiles. En la imagen de la izquierda muestra la diferencia entre la condición base y el escenario considerado para este trabajo.....	38
Figura 10. Condiciones de contorno del proyecto. Los paneles superiores son las condiciones de entrada y de salida (izquierda y derecha) y el panel inferior es el hidrograma ingresado.....	39
Figura 11. Esquema jerárquico Vulnerabilidad física estructural	41
Figura 12. Flujo metodológico susceptibilidad de las viviendas	42
Figura 13. Flujo metodológico modelo de proceso	44
Figura 14. Flujo de trabajo mapa vulnerabilidad	46
Figura 15. Zonas de desbordamientos de inundación en zona urbana. A) Disminución del ancho del cauce activo, B) Alcantarillado, C) Desbordamiento desembocadura.....	50
Figura 16. A) Cartografía de profundidades del flujo (m) y B) Cartografía de velocidades del flujo (m/s).....	51
Figura 17. Zonas de Alto peligro. A) Zona 0, B) Zona 1, C) Zona 3, D) Zona 4.....	52
Figura 18. Esquema vulnerabilidad física con pesos ponderados.....	53
Figura 19. Histograma de superficie (izquierda) y volumen (derecha) de las viviendas	54
Figura 20. A) Tipo de cimentación, B) Materialidad envolturas, C) Estado de Conservación de la envoltura, D) Número total de aberturas	55
Figura 21. Viviendas afectadas por escenario de crecida extrema.....	56
Figura 22. Histograma de calados máximos por viviendas	57
Figura 23. Gráfico de caja y bigotes de FNE (izquierda), Histograma de frecuencia absoluta de FNE (derecha).....	58
Figura 24. Cartografía de isolíneas de Fuerza Normal Específica (FNE) (N/m ²).	59
Figura 25. Gráfico de cambio morfológico por viviendas	60
Figura 26. Gráficos de tipos de materiales de envoltura (izquierda) y tipos de cimentación de las viviendas en base a valores de vulnerabilidad (derecha)	61
Figura 27. Cartografía Índice de Vulnerabilidad física.....	63
Figura 28. Cartografía de riesgo específico por inundaciones asociado al daño económico de las viviendas	65
Figura 29. Cartografía de impacto máximo del flujo	70

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Grupos y tipo de amenazas	22
Tabla 2. Tipos de mapas de inundaciones	29
Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (N_b)	36
Tabla 4. Resumen formulario ficha descriptiva	43
Tabla 5. Medidas y precios unitarios de materiales de cimentación	47
Tabla 6. Medidas y precios unitarios de materiales de fachadas	48

RESUMEN

La zona urbana de la ciudad de Chaitén se encuentra expuesta al riesgo de inundaciones debido a los múltiples cambios generados en la geometría del cauce y dinámica del río post evento eruptivo del año 2008, sumado a la constante ocupación de los corredores fluviales como lugares de asentamiento. Estos hechos denotan la importancia de la evaluación del riesgo de inundaciones en la ciudad.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar el riesgo específico por inundaciones en el área urbana de Chaitén, a partir del impacto generado por un escenario de crecida extrema en el río Blanco. Para llevar a cabo el objetivo, se analizó y cuantificó el impacto en las envolventes de las viviendas, mediante los datos hidráulicos arrojados por la simulación hidrodinámica del escenario de crecida extrema; se evaluó la vulnerabilidad física de las viviendas, a través de una metodología basada en indicadores y; por último, se cuantificó el daño esperado para un escenario de crecida extrema, a raíz de la vulnerabilidad obtenida y el valor de reconstrucción de las viviendas.

Los resultados obtenidos mostraron que, la inundación afecta especialmente el sector norte de la ciudad. A partir de ello, se identificaron y evaluaron cuatro zonas de alto peligro, compuestas por 70 viviendas localizadas principalmente en las áreas aledañas al cauce. El índice de vulnerabilidad física indica que las viviendas ubicadas a distancias menores del río son mayormente impactadas y vulnerables al peligro de inundaciones. Cerca de 12 de las viviendas ubicadas en las zonas de alto peligro presentan valores altos de daño esperado, lo cual refleja un alto riesgo para las personas que habitan estas áreas.

Finalmente, se discuten las recomendaciones para la mitigación del riesgo de inundaciones, la aplicación de la investigación en otras ciudades, las sugerencias para mejorar el método aplicado y se incentiva una mayor divulgación de este tipo de estudios en las comunidades.

Palabras claves: riesgo, impacto, vulnerabilidad física, daño esperado, Chaitén.

ABSTRACT

The urban area of the city of Chaitén is exposed to the risk of flooding due to the multiple changes generated in the geometry of the channel and the dynamics of the river after the eruptive event of 2008, added to the constant occupation of the river corridors as places of settlement. These facts denote the importance of flood risk assessment in the city.

The objective of this research work is to analyze the specific risk of flooding in the urban area of Chaitén, based on the impact generated by a scenario of extreme flooding in the Blanco River. To carry out the objective, the impact on the envelopes of residential buildings was analyzed and quantified, using the hydraulic data produced by the hydrodynamic simulation of the extreme flood scenario; the physical vulnerability of residential buildings was evaluated, through a methodology based on indicators and finally, the expected damage was quantified for an extreme flood scenario, based on the vulnerability obtained and the reconstruction value of the houses.

The results obtained showed that the flood especially affects the northern sector of the city. From this, four high-risk areas were identified and evaluated, composed up of 70 homes located mainly in the areas surrounding the riverbed. The physical vulnerability index indicates that the residential buildings located at shorter distances from the river are mostly impacted and vulnerable to the danger of flooding. About 12 of the residential buildings located in the high-risk areas show high values of expected damage, which reflects a high risk for the people who live in these areas.

Finally, the recommendations for flood risk mitigation, the application of the research in other cities, the suggestions to improve the applied method are discussed and a greater dissemination of this type of studies in the communities is encouraged.

Keywords: risk, impact, physical vulnerability, expected damage, Chaitén

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales corresponden a procesos naturales generados en los sistemas fluviales (Lytle y Poff, 2004), desencadenadas por factores como precipitaciones persistentes, lluvias intensas de corta duración, fusión de nieve y hielo, rotura de embalses e infraestructura hidráulica y crecidas asociadas a erupciones volcánicas (Rojas et al., 2014). Estos procesos se han convertido en eventos cada vez más peligrosos debido a la ocupación y urbanización de las llanuras aluviales, lo cual se ha transformado en un inminente riesgo para las comunidades e infraestructuras emplazadas en estas áreas. Como menciona Holub et al. (2012), las inundaciones son fenómenos naturales que no se pueden prevenir, por lo que afectan gravemente las actividades y el desarrollo económico de la población.

La urbanización de las zonas ribereñas ha sido un aspecto que ha acontecido a nivel mundial, por lo tanto, Chile no ha quedado exento de ello. Durante el último tiempo ha existido una mayor urbanización de las llanuras aluviales en el sur de Chile (Major et al., 2016). Según Basso-Báez et al. (2020), estas áreas durante caudales bajos presentan una alta dinamicidad debido a que son propensas a procesos de deposición, erosión y removilización.

La frecuencia y la dinámica exacerbada de las crecidas extremas se asocian principalmente al fenómeno del cambio climático, lo cual ha generado cambios en los niveles e intensidades de las precipitaciones (González, 2011). Rojas et al. (2016) menciona que, Chile ha sido identificado como uno de los países en riesgo de aumento de inundaciones, esto especialmente en las áreas donde se presenta una mayor urbanización. Los efectos producidos por las inundaciones en Chile han generado un deterioro en la calidad y nivel de vida de la población, especialmente en las infraestructuras, lo cual ha implicado inversiones millonarias para el Estado (Rojas et al., 2014). El deterioro de la calidad de vida se asocia a los daños generados en infraestructuras como las viviendas, consideradas elementos imprescindibles para el desarrollo y bienestar de la población.

Un caso de gran importancia en el país corresponde a lo sucedido en Chaitén, en donde producto de la erupción del año 2008 se desarrolló una gran inundación que generó severos daños y modificaciones tanto al río Blanco como al entorno construido de la ciudad (Pallister et al., 2013; Ulloa et al., 2015). En una reciente investigación se concluyó que incluso sin una nueva erupción volcánica extensas áreas de la ciudad continuarían siendo expuestas a las inundaciones, debido al desborde ocasionado por una posible obstrucción de la sección del puente con madera de gran tamaño (Basso-Báez et al., 2020). Actualmente, Chaitén se encuentra en riesgo por inundaciones, a pesar de algunos intentos de parte del Estado por disminuir el impacto de futuros desbordamientos. Parte de estos intentos son, la construcción de enrocados en ambas riberas del río y el encauzamiento del río en su nuevo curso hacia la desembocadura. Para esta ciudad es transcendental un análisis del riesgo por

inundaciones como una forma de gestionar el riesgo a través de medidas de prevención y mitigación, así como también, para planificar adecuadamente el uso del territorio (Mazzorana et al., 2012; Mazzorana et al., 2019).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las inundaciones fluviales se han transformado en eventos naturales cada vez más recurrentes debido a los efectos generados por el cambio climático durante el último tiempo (Sturm et al., 2018) y también, al aumento de la construcción de asentamientos en las llanuras de aluviales de los sistemas fluviales. Este peligro genera impactos significativos en las infraestructuras y comunidades, lo que causa grandes pérdidas económicas, sociales y ambientales (Vergara et al., 2011).

Las inundaciones fluviales son una amenaza de origen hidrológico, producidas principalmente por el desarrollo de fuertes precipitaciones que genera un desequilibrio en un momento y lugar determinado entre el volumen hídrico que se debe vaciar y la capacidad de evacuación del sistema de drenaje (Ferrando, 2006). Este desequilibrio, se debe la incapacidad o insuficiencia del curso de agua para drenar el volumen hídrico contenido, lo que genera el aumento progresivo en el nivel de las aguas y, por ende, el desbordamiento del río sobre las llanuras de inundación. La ocupación de estas ha generado que las inundaciones fluviales se conviertan en un inminente riesgo para la población, llegando a desencadenar consecuencias catastróficas. Ejemplo de ello, es lo ocurrido en el año 2020, en donde cerca de 27 provincias del centro y sur de China se vieron amenazadas por una gran inundación. Este desastre natural, ocasionó la muerte de 219 personas, destruyó cerca de 400.000 hogares y al menos 5 millones de hectáreas de cultivo. En cuanto a sus pérdidas directas, superan los 25.000 millones de dólares (Guo et al., 2020).

Las consecuencias generadas por las grandes crecidas podrían disminuir a través de una correcta evaluación del riesgo y de la implementación de instrumentos de prevención y mitigación, como una forma de gestionar y planificar el uso del territorio. Un instrumento de prevención es la cartografía de riesgo, que corresponden a una representación visual de la distribución del riesgo en un área específica (Renda et al., 2017), la cual estará determinada por la magnitud e impacto de la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Un claro ejemplo de la implementación de este instrumento sucedió en España, en donde a partir de 1998 se creó la Comisión Especial sobre la Prevención y Asistencia en Situaciones de Catástrofe como resultado del desastre del camping de Biescas en 1996, el cual generó un gran impacto social, causando la muerte de 87 personas. La Comisión Especial sobre Desastres establece en sus informes la creación de cartografías de riesgo de inundación, con la finalidad de orientar e informar las medidas, estrategias o políticas necesarias para prevenir el desarrollo de inundaciones (González, 2009). Asimismo, se desarrolló una serie de planes de protección civil como el Plan de Acción Territorial para la Prevención del Riesgo de Inundaciones (PATRICOVA), creado por la Comunidad Valenciana.

En el caso de Chile, en el año 2016, se aprobó una Política Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres, que tiene como objetivo otorgar a Chile un marco de referencia que permita implementar una gestión integral del riesgo de desastres, a través de acciones de prevención, respuesta y recuperación ante una catástrofe. En el cuarto eje estratégico: *Reducción de los Factores subyacentes del Riesgo*, se menciona como uno de sus objetivos específicos, el desarrollar y actualizar de forma permanente mapas de riesgo que contemplen las variables de amenaza, vulnerabilidad y exposición (Decreto 1512, 2016). Si bien se estableció en la ley el permanente desarrollo de cartografías de riesgo, estos se abocan principalmente a las amenazas de origen volcánico, relegando a las demás amenazas naturales que se suscitan en el país.

En Chile, las inundaciones fluviales constituyen uno de los principales riesgos naturales, debido a la formación de asentamientos poblacionales en las cercanías de las cuencas fluviales, lo que ha provocado el desenlace de grandes desastres (Rojas et al., 2014). Un ejemplo de ello es lo suscitado en el año 2015 en las ciudades de Copiapó, Chañaral y localidades de Atacama, en donde a partir de un fuerte temporal se desencadenaron aluviones, que provocaron el fallecimiento de 28 personas y generaron pérdidas evaluadas en 1.500.000.000 dólares (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2017).

Uno de los mayores desastres naturales ocurridos en el país es el acontecido en la ciudad de Chaitén, en donde producto de la erupción del volcán Chaitén entre los años 2008-2009 se produjo una gran inundación que afectó a gran parte de la zona urbana de la ciudad. Chaitén se localiza en la provincia de Palena, región de Los Lagos y posee un curso de agua llamado río Blanco, el cuál fluye desde el volcán Chaitén cruzando por la ciudad hasta el Océano Pacífico por aproximadamente 18 km. La erupción volcánica provocó severos cambios e impactos en su dinámica y morfología, a través de la ocurrencia de lahares y el transporte de grandes cantidades de sedimentos piroclásticos y de madera que se desplazan aguas abajo (Major et al., 2016). El desplazamiento de estos grandes volúmenes de material desencadenó la inundación de gran parte de la ciudad y desviación del antiguo cauce. Debido a las múltiples consecuencias generadas por este evento y al gran riesgo que implicaba habitar la zona, se evacuó a la población de la comuna y sus alrededores. Como consecuencia de ello, el gobierno de turno declaró inhabitable la ciudad de Chaitén, por lo que elaboró un Plan Maestro de reubicación en la localidad de Santa Bárbara. Sin embargo, la población se negó y comenzó a retornar a la ciudad, por lo que durante el año 2010 declararon habitable sólo el sector norte. La decisión tomada por el gobierno se fundamentó en estudios técnicos que sugerían implementar medidas de mitigación para disminuir la exposición de la población e infraestructura (Sandoval, 2015). Las medidas de mitigación sugeridas fueron principalmente la construcción de enrocados en ambas riberas y el encauzamiento del río en su nuevo cauce hacia la desembocadura.

Los impactos directos observados en la cuenca boscosa, en la geometría del cauce y en las disponibilidades de sedimentos y de material leñoso, denotan la gran perturbación ocurrida en el río Blanco, el cual hasta los días de hoy sigue reelaborando permanentemente grandes volúmenes de sedimentos. Según lo mencionado por Mazzorana et al. (2019): "...la actual dinamicidad a lo largo de las barras y orillas del canal activo (es decir, la intensa erosión lateral, el ensanchamiento del río) es notable y, por lo tanto, debe esperarse un rápido aumento de la conectividad a escala de la cuenca y considerarse cuidadosamente en la gestión de los corredores fluviales y, en particular, en la evaluación y mitigación de los riesgos". A pesar de los diversos impactos y modificaciones suscitadas en el río Blanco y en el entorno construido, hoy en día no existen estudios destinados al análisis del riesgo por inundaciones, en donde se simule el eventual comportamiento de una crecida fluvial extrema, el impacto y la respuesta de las estructuras ante dicho peligro. Por lo anteriormente señalado, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo general analizar el riesgo específico por inundaciones en el área urbana de Chaitén, a partir del impacto producido por un escenario de crecida extrema en el río Blanco, post evento eruptivo. Debido a la escasez de datos hidrológicos del río Blanco, se simuló un escenario de gran magnitud, bajo un contexto de afectación por volcanismo y que supere considerablemente los caudales simulados en otros trabajos realizados en la zona, es decir, que supere un tiempo de retorno de entre 200-300 años.

La gestión integral del riesgo a través de instrumentos de planificación territorial es fundamental para reducir de manera sostenible las pérdidas relacionadas al peligro por inundaciones (Mazzorana et al., 2019). Como consecuencia de ello, se diseñan estrategias de mitigación y prevención que disminuyen las consecuencias dañinas generadas por el peligro de inundaciones. El análisis del riesgo permite identificar la exposición, cuantificar los impactos, la vulnerabilidad de los elementos expuestos y el daño esperado generado por el escenario de peligro. Elaborar instrumentos de análisis como cartografías de riesgo es de vital importancia, especialmente para Chaitén, debido a que es una herramienta base que permite orientar a la población y a las demás autoridades gubernamentales en la toma de decisiones relacionadas a la reducción y mitigación del riesgo de desastres.

El presente trabajo de titulación se enmarca en el proyecto **FONDECYT N° 1200091, denominado "Unravelling the dynamics and impacts of sediment-laden flows in urban areas in southern Chile as a basis for innovative adaptation (SEDIMPACT)"**, coordinado por el investigador responsable Bruno Mazzorana.

3. OBJETIVOS

A continuación, se detallan los objetivos generales y específicos relacionados a las preguntas de investigación. Las preguntas planteadas y objetivos se refieren al escenario de inundación específico simulado.

3.1. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- a) ¿Qué viviendas del área estudiada son mayormente afectadas por el impacto del flujo?
- b) ¿Cuál es la distribución espacial de los edificios residenciales que presentan vulnerabilidades altas?
- c) ¿Qué zona de alto peligro presenta un mayor daño esperado?

3.2. OBJETIVO GENERAL

- a) Analizar el riesgo específico por inundaciones en el área urbana de Chaitén, a partir del impacto producido por un escenario de crecida extrema en el río Blanco, post evento eruptivo del año 2008-2009.

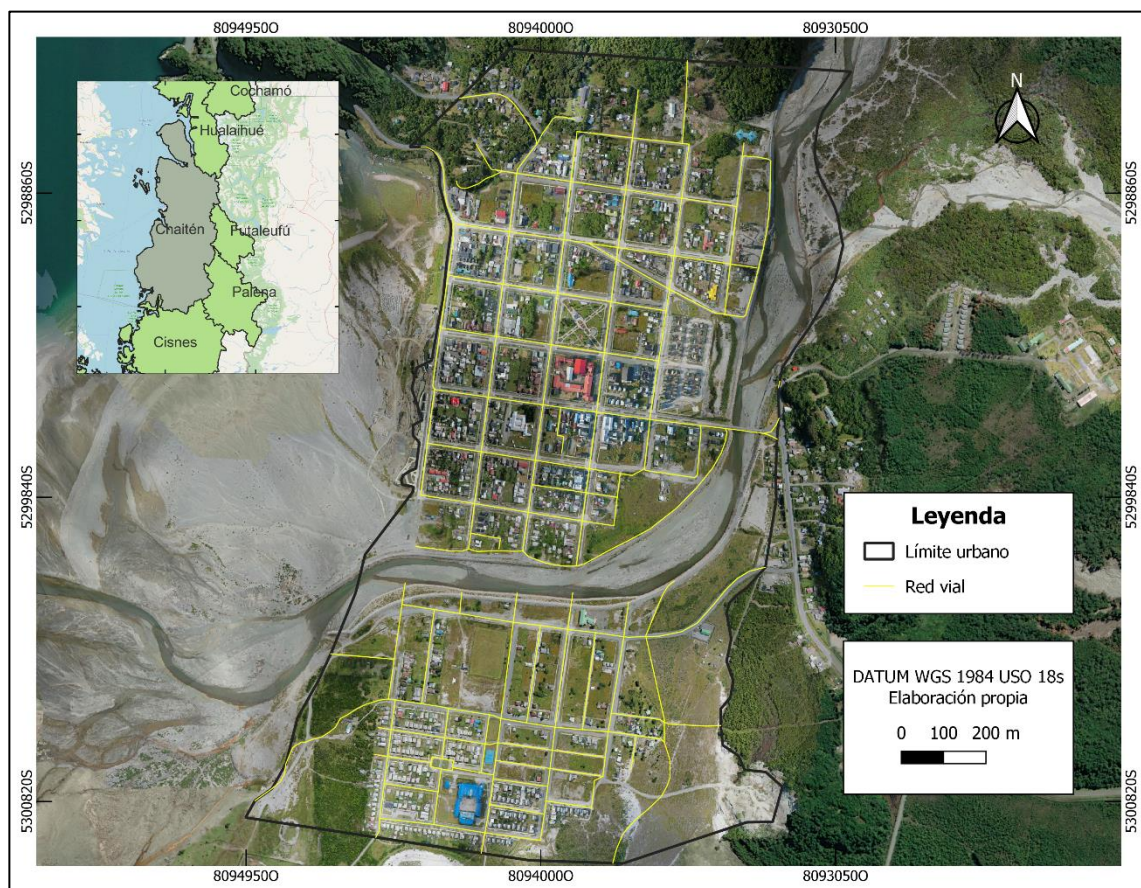
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analizar el impacto del flujo sobre las envolturas estructurales de las viviendas, a partir de un escenario de crecida extrema
- b) Evaluar la vulnerabilidad física de los edificios residenciales ubicados en las zonas de alto peligro
- c) Cuantificar el daño esperado para un escenario específico de riesgo por inundaciones

3.4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la zona urbana de la localidad de Chaitén y el río Blanco, el cual fluye desde el volcán Chaitén, cruzando la ciudad hasta el Océano Pacífico por aproximadamente 18 km. Se ubica en la provincia de Palena, región de Los Lagos, específicamente entre los 42° 55' latitud sur y 72° 42' longitud oeste. Dicha zona se emplaza en el borde costero de la comuna de Chaitén, rodeada al norte por un cordón montañoso, al oeste por la playa, al sur por la antigua desembocadura del río Blanco y al este por la cuenca del mismo (Díaz, 2013). Posee una superficie de 3 km² aprox. y se encuentra a una altura promedio de 6,4 m.s.n.m.

Figura 1. Cartografía Área de estudio: Zona urbana de Chaitén y río Blanco



Fuente. Elaboración propia

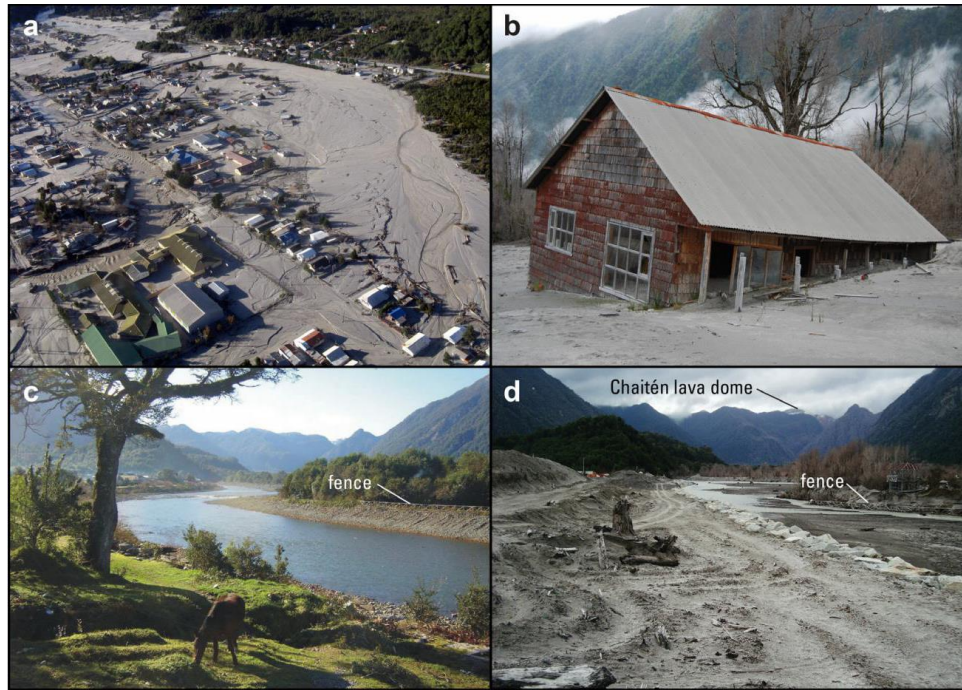
Según la clasificación de Köppen modificada, Chaitén posee un clima templado lluvioso sin estación seca con una mayor presencia de precipitaciones durante la temporada de invierno, es decir, de mayo a julio (Ciren, 2017). Su precipitación media anual es de 3.408 mm de agua, conforme a la información de la Estación meteorológica de la Dirección General de Aguas, operativa entre 1998 y 2007 (Dirección de obras hidráulicas, 2014).

La flora del área de estudio está compuesta principalmente por tres tipos de bosques nativos, dentro de los cuales se encuentra el bosque siempreverde con una mayor presencia de *Nothofagus dombeyi*, *Fitzroya cupressoides*, bosque de altura con una predominancia de *Nothofagus pumilio* y *Nothofagus antarctica*. Respecto a la fauna, es posible encontrar especies como el puma, cóndor, el quique, el huillín, chungungos y coipos (González, 2011).

La morfología del terreno donde se emplaza la comuna de Chaitén corresponde a una continuación de la Cordillera de Los Andes que desciende abruptamente hacia el mar en forma de valles y fiordos, presentando macizos que no superan los 2.500 msnm (Ciren, 2017). Los principales volcanes que componen la zona son el Corcovado (2.300 msnm), Michimahuida (2.404 msnm) y Chaitén (962 msnm).

La erupción del volcán Chaitén inició el 2 de mayo del 2008 y continuó durante el año 2009, siendo una de las mayores erupciones volcánicas producidas durante los últimos 30 años (Major y Lara, 2013; Maldonado et al., 2016). El proceso eruptivo se constituyó de tres fases eruptivas, marcadas por la caída de tefras y posteriores derrumbes de domos de lava que aportaron grandes volúmenes de sedimentos y material leñoso al río Blanco (Major et al., 2016). Las fuertes precipitaciones ocurridas 10 días después de la erupción removieron grandes volúmenes de sedimentos acumulados, lo cual causó la formación de lahares que generaron degradación del cauce y la inundación de gran parte de la zona urbana. Como resultado de la crecida y el arrastre de grandes cantidades de sedimento, el río Blanco avulsionó lateralmente, desviándolo por el centro de la ciudad hasta desembocar en el mar. La generación del nuevo canal dividió la ciudad en dos zonas: Chaitén Norte y Chaitén Sur. De acuerdo con lo mencionado por Maldonado et al. (2016), la formación de este nuevo canal arrasó con aproximadamente once manzanas e inundó el resto de la ciudad con agua, madera, lodo y cenizas. Si bien no se generaron pérdidas humanas debido a la pronta evacuación de los locatarios, se produjeron severos daños y pérdidas materiales, principalmente en los edificios residenciales. Algunos de ellos, fueron barridos por completo y otros fueron impactados por restos de madera y sedimentos que ingresaron a través por sus aberturas (Basso-Báez et al., 2020).

Figura 2. Imágenes de daños causados por inundaciones y sedimentación en la localidad de Chaitén. A) Extensa acumulación de sedimentos y avulsión de Chaitén Blanco, b) Vivienda enterrada por sedimentos depositados sobre la orilla de la terraza, C) Vista previa a la erupción del río Blanco mirando aguas arriba (norte) desde el puente "Carretera Austral" en la localidad, D) Vista de post erupción desde la misma ubicación.

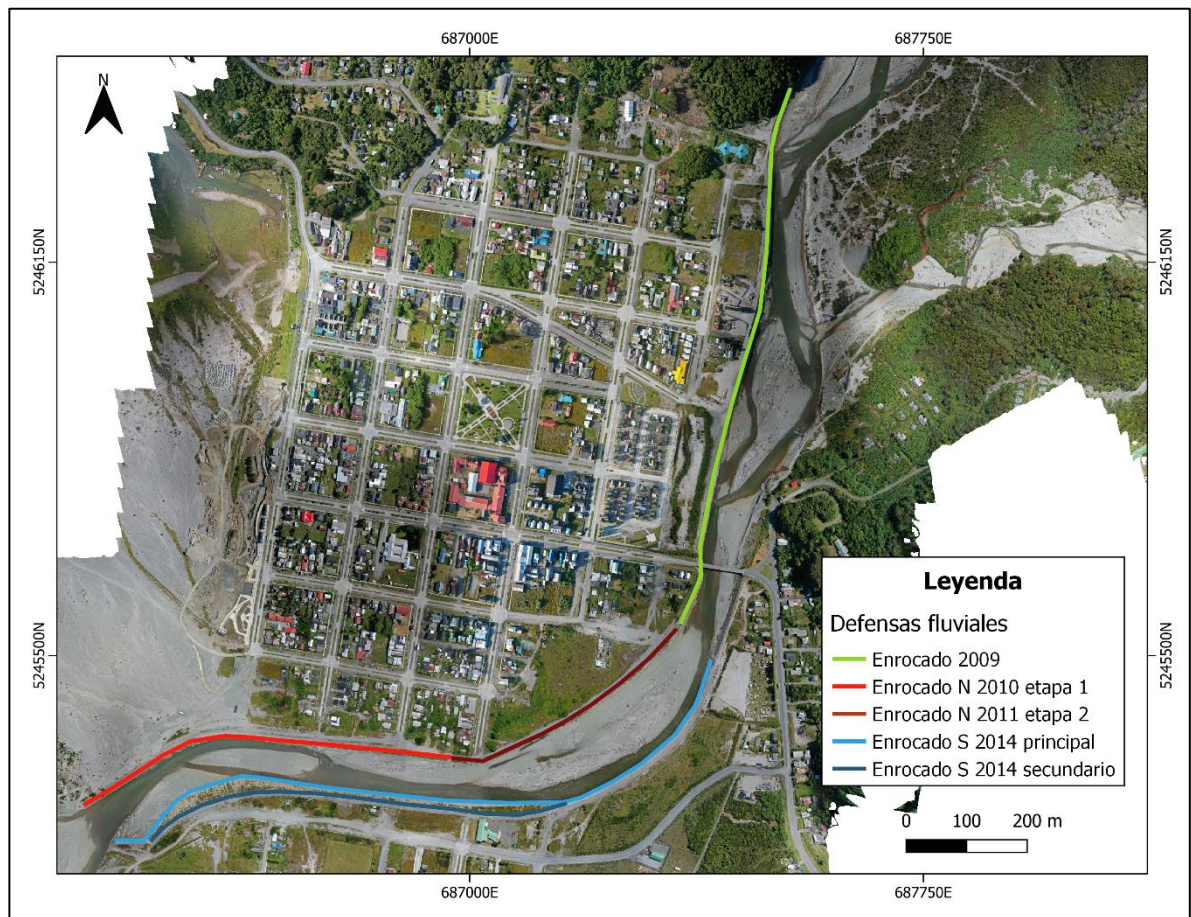


Fuente. Extraída de Major et al. (2013).

Luego de los procesos en cascada, Chaitén fue declarado inhabitable debido a las consecuencias generadas en la zona urbana. Los locatarios insistieron para retornar a sus hogares pese al plan de reubicación propuestos por las autoridades, por lo que la municipalidad de la comuna sugirió la construcción de defensas fluviales para evitar erosión de las riberas y desbordamientos del río (Rute, 2014). Entre los años 2009 y 2011 la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas construyó enrocados, aguas arriba del puente "Carretera Austral" y efectuó el volteo de rocas en la ribera izquierda del río como medida temporal (Dirección de Obras Públicas, 2014). Para los años 2010-2011 la Dirección Regional de Obras Hidráulicas (DOH) aprobó la construcción del enrocado en la ribera derecha del río, desde el puente hasta la desembocadura. La construcción de la defensa fluvial se llevó a cabo en dos etapas, en la primera de ellas se construyó un enrocado de 477,2 m de longitud, un ancho de 2 m y una altura de 5 m, de las cuales 2 m corresponden a fundación y 3 m sobresalen (Rute, 2014). En la segunda etapa, se fabricaron dos enrocados. El primero de ellos se localizó en la ribera derecha del río Blanco, a 80 m aguas abajo del puente, con una longitud de 406 m y alturas que varían entre los 5,5 y los 6,5 m. La segunda

defensa, se construyó aguas abajo del enrocado construido en la desembocadura. Posee 130 m de largo y una altura de 5 m (Rute, 2014). Finalmente, en el año 2014 se construyó una defensa para proteger el sector sur de la ciudad, esta consta de dos enrocados, uno denominado “principal” ubicado en la ribera sur del río y el “secundario” localizado en lo que actualmente es terreno (Dirección de Obras Públicas, 2014).

Figura 3. Mapa de defensas fluviales construidas en Chaitén



Fuente. Elaboración propia

4. MARCO TEÓRICO

4.1. RIESGO DE DESASTRES

El riesgo dado a su carácter multidisciplinario posee diversas definiciones asociadas a los distintos enfoques que se le ha brindado en los estudios del riesgo, por lo que es difícil otorgarle una definición integral (Rojas et al., 2011). No obstante, Schneiderbauer et al. (2004) define el riesgo como: “probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas como resultado de un peligro dado, para un elemento determinado en peligro o en riesgo durante un periodo de tiempo específico”.

El riesgo de desastre, por su parte, se define como la probabilidad de ocurrencia de una determinada amenaza de origen natural o socio-natural en un lugar específico, capaz de generar potenciales daños o impactos sobre la población y los elementos o recursos expuestos en el lugar (Rojas et al., 2011). Una definición ligada al análisis técnico del riesgo, lo define como una función que calcula la probabilidad de ocurrencia de un proceso y la extensión de los daños, especificado por el daño potencial y la vulnerabilidad (Fuchs, 2009; Mazzorana et al., 2010):

$$R_{i,j} = f(p_{Si}, A_{Oj}, p_{Oj, Si}, v_{Oj, Si}) \quad (1)$$

Para cuantificar el riesgo ex ante es preciso mencionar las siguientes especificaciones (Mazzorana et al., 2010):

$R_{i,j}$: riesgo dependiente del escenario i y el objeto j

p_{Si} : probabilidad del escenario i

A_{Oj} : valor del objeto j, obtenido mediante técnicas de valoración económica.

$p_{Oj, Si}$: probabilidad de exposición del objeto j para el escenario i

$v_{Oj, Si}$: vulnerabilidad del objeto j, dependiente de la intensidad del escenario i.

A partir de la expresión señalada anteriormente, se desprende que los factores que configuran el riesgo son: amenaza (H), exposición (E), vulnerabilidad (V) y valor de los elementos expuestos (V_e). Por tanto, la ecuación conceptual del riesgo está dada por la siguiente fórmula:

$$R = H * E * V * V_e \quad (2)$$

Según lo mencionado Mazzorana et al. (2012) el riesgo es un concepto estático debido a que está sujeto a cambios temporales, dado que los factores (escenario de peligros y elementos expuestos) que lo componen son dinámicos en tiempo. Estos factores del riesgo pueden ser disminuidos o mejorados a través de medidas de prevención, reducción y mitigación del riesgo.

Asimismo, el análisis del riesgo se define como la obtención de conocimiento suficiente para definir y caracterizar la amenaza, la población o elemento vulnerable y la zona afectada (Renda et al., 2017). Por lo tanto, a través de este análisis se puede estimar los daños o pérdidas ocasionadas por los escenarios de riesgo, la probabilidad de ocurrencia y la magnitud de los daños. Mazzorana et al. (2012) señala que la evaluación del riesgo se compone en al menos cinco niveles:

- a) Escenario de peligros naturales
- b) Escenarios de exposición
- c) Escenarios de vulnerabilidad
- d) Análisis de valores en riesgo
- e) Escenarios de riesgo

4.1.1. AMENAZA

La amenaza o peligro natural es un factor externo del riesgo, que hace referencia a la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente dañino en un lugar y tiempo determinado, presenta una intensidad y/o magnitud dada que puede causar efectos contraproducentes en la población, infraestructuras y servicios (Cardona, 2001; Renda et al., 2017). United Nations International Strategy for Disaster Reduction (2009), define amenaza como un: “Fenómeno, sustancia, actividad o condición humana peligrosa que puede causar pérdida de vidas, lesiones u otras repercusiones en la salud, daños a la propiedad, pérdida de medios de subsistencia y servicios, perturbación social y económica o daños ambientales”.

De acuerdo con lo señalado por Schneiderbauer et al. (2004) existen cuatro grandes grupos de amenaza, subdivididos en función de sus distintos orígenes (tabla 1). El análisis de una amenaza comprende procesos como la identificación, evaluación del peligro y la planificación de medidas de mitigación. El primero de ellos, permitirá determinar su origen, el área afectada, la intensidad, la magnitud alcanzada y el segundo, genera acciones que permitan aminorar los posibles daños que ocasiona el evento (Renda et al., 2017)

Tabla 1. Grupos y tipo de amenazas

Grupo de amenaza	Tipo de amenaza	Ejemplos
Natural	Geológica	Terremoto, erupción volcánica, deslizamiento de tierra, subsidencia
Potencialmente socio-natural	Meteorológica	Ciclones, relámpagos e incendios, sequía, avalancha, granizada, ola de frío
	Oceanográfica	Tsunami, tormenta de mar
	Hidrológica	Inundaciones
	Biológica	Epidemias, plagas de insectos
Tecnológica	Explosión	
	Liberación de materiales tóxicos	
	Contaminación severa	
	Colapso estructural	
	Transporte, construcción o accidente de fabricación	
Social/amenaza provocada por hombre	Actividad terrorista	Bombardeos, disparos, secuestros
	Conflicto político	Guerra internacional y civil, revolución, golpe de Estado

Fuente. Extraído y modificado Schneiderbauer et al. (2004).

4.1.1. EXPOSICIÓN

Según lo mencionado por Olcina (2006), exposición es un conjunto de elementos, bienes o condiciones que presenta un grupo de personas que es susceptible a ser afectada por la ocurrencia de una amenaza (Rojas et al., 2011). La exposición contempla a poblaciones, infraestructuras, servicios, actividades económicas, etc. Fuchs (2009) considera que este factor define la susceptibilidad de los valores expuestos a ser afectados por la amenaza, debido a su ubicación en el área donde se desencadena el proceso.

4.1.2. VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es un factor interno del riesgo, que se define como la susceptibilidad de una comunidad, elemento o sistema a ser afectado negativamente por el impacto de una amenaza, que presenta una frecuencia y magnitud dada (González, 2011). La predisposición intrínseca a ser afectado se debe principalmente a factores físicos, sociales, económicos y ambientales que presenta el territorio y/o comunidad (Cardona, 2001).

La Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (UNDRO) (Fuchs et al., 2019) define la vulnerabilidad como: “el grado de pérdida de un elemento determinado o conjunto de elementos, dentro de la zona afectada por un peligro”. Por su parte, los científicos naturales se enfocan en las intensidades de impacto y en la susceptibilidad de las estructuras, las cuales varían desde 0 (sin daños) a 1 (destrucción completa).

La vulnerabilidad es un concepto multidimensional, compuesto por dimensiones económicas, sociales, ecológicas o ambientales y físicas (Blanco-Vogt, 2014). La primera de ellas tiene relación con los daños a las actividades económicas, los procesos de producción, distribución y consumo. La segunda dimensión, hace referencia al conjunto de características y experiencias que posee una población vulnerable, contemplando sus medios de vida, educación, cultura, niveles de organización social y capacidad de resiliencia. La dimensión ecológica, reconoce la fragilidad del medio ambiente ante una amenaza y la capacidad de recuperarse frente a esta. Por último, la dimensión física (estructural) mide la exposición de las viviendas, la estabilidad y comportamiento de su estructura frente al impacto de una amenaza (Kumpulainen, 2006; Arévalo, 2017).

Si bien las dimensiones de la vulnerabilidad están ampliamente relacionadas entre sí, la vulnerabilidad física es el elemento de partida para el desarrollo de una pérdida física, que puede influir en las pérdidas de las demás dimensiones de la vulnerabilidad (Mazzorana et al., 2014). Es por ello que, el presente trabajo de investigación se enfocó principalmente en esta dimensión de la vulnerabilidad.

4.1.2.1 VULNERABILIDAD FÍSICA ESTRUCTURAL

Cifuentes (2011) afirma que la vulnerabilidad física es el nivel potencial de daño que puede afectar a un elemento, en función de su exposición y resistencia frente a la magnitud de la amenaza. Arévalo (2017) la define como: “características físicas de construcción o

condiciones técnicas con que fue elaborada una edificación y que inciden directamente en el comportamiento estructural de la edificación frente a una amenaza”.

Tal como menciona Blanco-Vogt (2014), la vulnerabilidad física estructural está compuesta por los factores de susceptibilidad, función y capacidad de afrontamiento o adaptación. La susceptibilidad se refiere a la propensión de las estructuras a sufrir daños, dadas las características geométricas, estructurales y materialidad que presenten. Por tanto, el comportamiento de la estructura dependerá principalmente de la resistencia de los materiales con que fue construida, el tipo de construcción, tamaño y el estado de conservación del edificio antes del impacto de la amenaza. Los comportamientos de las estructuras tras recibir el impacto pueden ser degradación, fallo, deformación de materiales, etc. El factor función alude al propósito con que fue construido o diseñado el edificio, dado que el tipo de construcción condicionará el diseño de la estructura, la cual resistirá cada una de las cargas estructurales a las que estará sujeta. Por otro lado, la capacidad de adaptación refiere a la capacidad que poseen los elementos protectores de recuperar rápidamente el estado inicial del edificio, luego del impacto de una amenaza.

La vulnerabilidad física no solo depende de las características físicas de construcción, sino también del proceso de impacto, es decir, de la intensidad del impacto, dirección del flujo y porcentaje de sedimentos dentro del agua. La interacción entre ambas variables es fundamental para la cuantificación de la vulnerabilidad física (Mazzorana et al., 2014).

Para la evaluación de vulnerabilidad física se han desarrollado principalmente tres enfoques: matrices, curvas e indicadores de vulnerabilidad. Las matrices de vulnerabilidad son un método cualitativo basado en datos empíricos o en juicio de expertos, que entrega información clara de la relación entre el proceso y su consecuencia. Las curvas de vulnerabilidad son el enfoque cuantitativo más común, que relaciona empíricamente la intensidad del proceso de amenaza (eje x) con la respuesta al daño de una vivienda (eje y). Por último, el enfoque basado en indicadores consiste en la creación de un índice de vulnerabilidad para cada edificio, a partir de la selección de un grupo de indicadores, ya sea de características del edificio o del proceso de amenaza, los cuales serán ponderados y agregados (Papathoma Köhle et al., 2017; Papathoma Köhle et al., 2019). Existen diversos métodos de selección y ponderación de indicadores, entre los cuales se destaca el juicio basado en expertos. Entre los indicadores utilizados para la creación de este índice se puede mencionar: materiales de paredes, orientación, altura de los edificios circundantes, altura de los escombros, altura pared (Papathoma Köhle et al., 2019), estado conservación, tipos de edificios, presencia estructuras de protección (Fuchs, 2009), profundidad, velocidad, presiones de flujo (Holub et al., 2012).

4.1.3. VALOR DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS

Este factor hace alusión al valor del objeto que está expuesto a una determinada amenaza, expresado en valor monetario, lo cual supone una valoración económica de los daños ocasionados en los elementos expuestos al riesgo (Mazzorana et al., 2012). El valor considerado en este trabajo de investigación corresponde al valor de reconstrucción o reposición, calculado a través de la expresión sugerida por Gallerini et al. (2011).

$$NV = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} * p_{ij} \quad (3)$$

Donde NV corresponde al Valor de Reconstrucción, q_{ij} es la unidad requerida j para realizar la unidad del flujo de trabajo de construcción i , p_{ij} es el precio unitario de la unidad de flujo de trabajo de construcción (Mazzorana et al., 2012).

4.2. TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE CHAITÉN

La vivienda en Chaitén es considerada un elemento central en la configuración de la ciudad, no tan sólo porque es el principal uso que se repite en este asentamiento, sino también porque representa el espacio único e íntimo de cada una de las personas. La identidad de la ciudad de Chaitén ha sido construida desde que arribaron los primeros colonos a la zona, quienes insertaron costumbres, tradiciones y formas de habitar el espacio. Una de las principales tradiciones plasmadas en la ciudad corresponde a las formas de construcción y de materialidad de las viviendas, lo que permitió crear una tipología de construcción característica.

A partir de la geografía y de los distintos procesos migratorios que se han suscitado, se ha ido construyendo una arquitectura propia formada por la cohesión de dos influencias, una procedente desde el archipiélago de Chiloé y otra, desde la pampa argentina (Díaz, 2013). En cuanto a la influencia chilota, esta surge aproximadamente en 1920 a partir de la llegada de las primeras familias chilotas que cruzaron hacia el continente en busca de nuevas tierras de cultivo y pastoreo. Esta primera migración trajo consigo una serie otras migraciones de población chilota que fueron incorporando fuertemente su acervo cultural en los diversos ámbitos de la vida cotidiana, especialmente en el área de las tradiciones constructivas (Díaz, 2013). La tradición constructiva chilota (figura 4) se vio reflejada en el uso de la madera, como un material común y característico en la construcción de las viviendas, las cuales eran

fabricadas por los mismos carpinteros procedentes de la isla. La madera no sólo fue utilizada para las estructuras o paredes de las viviendas, sino también para cubrirlas de la lluvia, a través del uso de la tejuela.

Figura 4. Vivienda de arquitectura chilota. Nótese la confección con tejuelas y la delimitación perimetral de madera



Fuente. Elaboración propia

Tal como menciona Díaz (2013): “El hecho de que la arquitectura chilota se haya constituido de manera aislada de los principales acontecimientos urbanos le dio un carácter único, y cuando llegaban influencias externas se incorporaban a través de una reinterpretación selectiva”. Esta forma de incorporar las influencias externas permitió añadir al uso de la madera otros materiales de construcción como las planchas de fierro ornamentado y zinc, papeles murales, etc.

Figura 5. Vivienda de arquitectura con influencia externa a la ciudad. Se visualiza la incorporación de planchas de zinc en las fachadas



Fuente. Extraído de Agrupación Cultural Chaitén (2018)

Por otro lado, la influencia de la pampa argentina emerge durante los años 30, cuando migran colonos chilenos provenientes de zonas argentinas a Chaitén en busca de tierra propia. La llegada de estos colonos trajo consigo distintas costumbres, las cuales se vieron reflejadas en sus métodos de construcción, enfocados en la albañilería y en el uso del ladrillo como material característico. Otro aspecto importante de la influencia argentina en la arquitectura de Chaitén es la radical separación de la interioridad de la vivienda con el mundo exterior a través de la construcción de muros y pequeñas puertas y ventanas que disminuían la relación de la vivienda con el mundo externo (Delgado et al., 2005).

En la actualidad, ambas influencias permanecen en la ciudad, pero sin lugar a duda la arquitectura que tiene mayor influencia es la chilota, marcada por una arquitectura única y singular. En general, gran parte de las viviendas que conforman el casco urbano son de mediana dimensión, con una altura de 1 a 2 pisos, cimientos de hormigón o levantadas a nivel del suelo y su principal material continúa siendo la madera.

4.3. RIESGO DE INUNDACIONES

Antes de comprender el riesgo que implican las inundaciones, es importante reconocer que son y cómo se originan. Según lo mencionado por Ferrando (2006) las inundaciones son el resultado de procesos de recurrencia interanual como las crecidas de los cursos de agua, las cuales son originadas en gran parte por el desarrollo de fuertes precipitaciones y por la incapacidad o insuficiencia del curso de agua para evacuar el volumen hídrico contenido. Es decir, se genera un desequilibrio en un tiempo y un lugar determinado, entre el volumen hídrico que se debe evacuar en una parcela de tiempo y la capacidad de evacuación de los sistemas de drenaje. La capacidad de carga de los sistemas fluviales se ve alterada, por lo que el aumento del volumen hídrico, sumado al transporte y arrastre de sedimentos influirá directamente en el desarrollo inundaciones.

Doswell (2003) menciona que las inundaciones son el producto de la concatenación de una serie de procesos meteorológicos e hidrológicos. Con respecto a los procesos meteorológicos, se refiere al comportamiento de las precipitaciones y al clima que posee ese determinado lugar. En cambio, dentro de los procesos hidrológicos contempla la pendiente del terreno, el tipo de suelo, la cubierta vegetal, etc. De igual forma, Ferrando (2006) sugiere que las características del régimen pluviométrico y térmico, las características morfométricas de la cuenca y la capacidad de retención hídrica de esta influyen en la torrencialidad, la velocidad de respuesta, el tiempo de concentración y la magnitud de los caudales.

En cuanto al riesgo, las inundaciones son uno de los procesos de amenazas naturales que más grandes pérdidas económicas, sociales y ambientales generan, debido a la ubicación de la población y de sus actividades productivas en zonas potenciales de inundación. Los desastres por inundaciones son eventos cada vez más recurrentes debido a la creciente urbanización que experimentan las ciudades, lo que genera la construcción de asentamientos poblacionales en llanuras aluviales, como resultado de una inadecuada gestión y planificación del territorio (Vergara et al., 2011).

El emplazamiento de las ciudades en las zonas de riesgo agudiza la exposición y la vulnerabilidad de la población ante un eventual desastre natural, por lo que la elaboración de medidas de prevención y de mitigación que consideren al ser humano, elementos en riesgos y medio natural, son claves para una adecuada gestión del territorio. Dentro de las medidas de prevención, uno de los instrumentos más eficaces, racionales y menos agresivos para la reducción del riesgo es la ordenación del territorio a escala local y la elaboración de mapas de riesgos. Algunas de las medidas de mitigación implementadas son la construcción de obras de ingeniería hidráulica como, por ejemplo, encauzamiento, canalizaciones o colectores de agua pluvial (Olcina, 2004).

4.4. CARTOGRAFÍAS DE RIESGO

Las cartografías de riesgo son una herramienta fundamental para establecer y adoptar decisiones técnicas, financieras y políticas relacionadas con la mitigación y la gestión del riesgo de inundación (Mazzorana y Fuchs, 2010). Por tanto, ayudan a la prevención del riesgo, determinación de construcción de obras hidráulicas, así como también en la planificación del territorio.

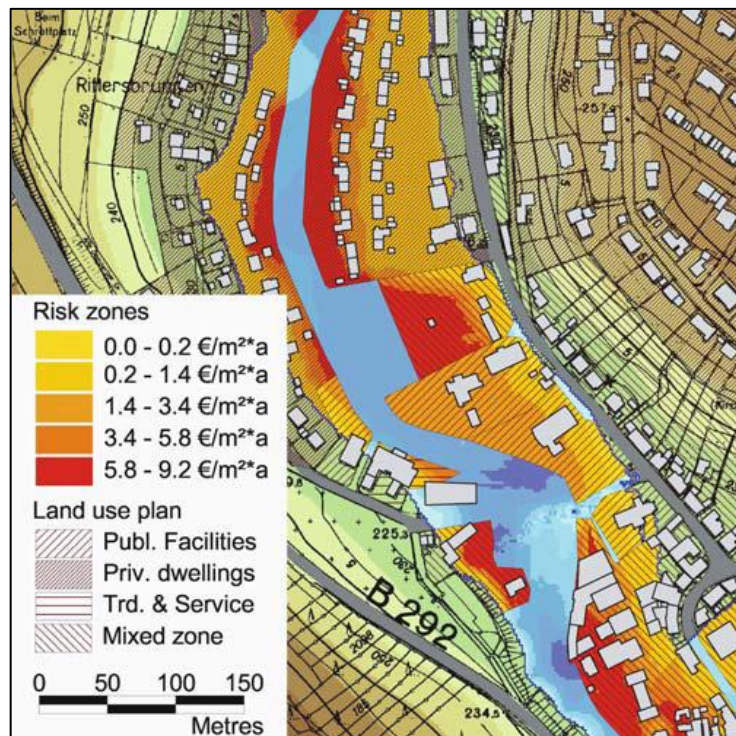
Las cartografías de riesgo son una representación espacial o geográfica de los daños físicos, económicos y ambientales generados por el desarrollo de una amenaza, en un lugar y tiempo específico (Renda et al., 2017). Estos muestran las potenciales consecuencias adversas generadas por distintos escenarios de inundación (Mazzorana y Fuchs, 2010). Son elaborados principalmente por la superposición o combinación de los mapas de amenaza y vulnerabilidad. Hoy en día existen una variedad de conceptos y metodologías para elaborar mapas de riesgos por inundaciones. Merz et al. (2007) propone un mapeo sistemático de inundaciones (tabla 2)

Tabla 2. Tipos de cartografías de inundaciones

Tipos de cartografías	Definición
Cartografía de amenaza de inundación	Muestra la distribución espacial del peligro de inundación, es decir, información sobre la intensidad de la inundación y la probabilidad de ocurrencia para uno o varios escenarios de inundación. (e.g. Mapas de área de inundación para 100 años, que muestre la distribución de su duración o profundidad del área inundada)
Cartografía vulnerabilidad a inundaciones	Muestra la distribución espacial de la vulnerabilidad a las inundaciones, es decir, información sobre la exposición y/o la susceptibilidad de los elementos propensos a inundaciones (población, entorno construido, entorno natural). (e.g. Mapa del área de inundación de 100 años de tiempo de retorno y edificios inundados)
Cartografía de riesgo de daños por inundaciones	Muestra la distribución espacial del riesgo de daño por inundación, es decir, el daño esperado para uno o varios eventos con una cierta probabilidad de excedencia (e.g. Mapas de áreas propensas a inundaciones más la expectativa de daño monetario)

Fuente. Extraído y modificado de Merz et al. (2007).

Figura 6. Cartografía de riesgo de inundación: Distribución del daño en €/m² esperado para la inundación



Fuente. Extraído y modificado de Merz et al. (2007).

Las cartografías de riesgo poseen niveles, los cuales son establecidos a través del análisis de las variables que lo componen. Los niveles que generalmente se reconocen son: bajo, medio, alto y muy alto.

La elaboración de las cartografías de riesgo se realiza a través de sistemas de información geográfica, los cuales poseen múltiples herramientas para el análisis y evaluación de inundaciones, desde simulaciones hidrodinámicas para evaluar el alcance de las repercusiones de los eventos hidrológicos (Spachinger et al., 2008), tratamientos de variables y parámetros de vulnerabilidad y exposición extraídas desde bases censales, cartográficas integrales de riesgo, etc. (Llorente et al., 2009). Existen diversas metodologías para elaborar cartografías de riesgo, las cuales variarán según el tipo de amenaza, variables utilizadas, escalas y métodos de análisis.

4.5. ESCENARIO DE INUNDACIÓN DE LA CIUDAD DE CHAITÉN

4.5.1. INCERTIDUMBRE HIDROLÓGICA

La información hidrológica es la base para entender todos los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca (McMillan et al., 2018). Sin estos datos, las proyecciones o simulaciones hidrológicas sufren un aumento en la incertidumbre, generan errores o vicios en su desarrollo e interpretación, lo cual desemboca en un aumento en los costos de manejo y empeoraran las decisiones tomadas en relación con la gestión del riesgo (Montgomery y Sanders, 1986; McMillan et al., 2017). La cuantificación de cualquier recurso o proceso hidrológico siempre tendrá una incertidumbre en sus resultados, eso es inclusive si existe un aprovisionamiento metodológico (como análisis estadísticos, interpolación, etc.) para suplir la falta de datos inherente a este tipo de estudios (Moss, 1979). Sin embargo, una cosa es segura: no importa qué clase de estrategia se utilice para mitigar la falta de datos, la información hidrológica no puede ser sustituida (Moss, 1979).

En el caso de los flujos de gran magnitud, su estudio y análisis espacial se ve limitado por la insuficiente información hidrológica del río, tanto de los eventos normales como los de gran magnitud (Viero et al., 2014; Li et al., 2019). Existen en el mundo una enorme cantidad de cuencas con escasa medición hidrológica como precipitación o caudal (Li et al., 2019), siendo la cuenca del río Blanco una de ellas. A pesar de la falta de datos se ha desarrollado una estadística hidrológica para eventos de tiempo de retorno de 100 años. Sin ahondar en las metodologías que cada uno de estos trabajos utilizaron, se puede observar la significativa diferencia en los resultados a la hora de tratar los mismos datos. Esto no quiere decir que los trabajos presentados no hayan tenido un rigor metodológico en la utilización de los datos, sin embargo, no se puede negar que dependiendo la interpretación de la información hidrológica y de la forma de utilizar las metodologías se pueden desarrollar diferencias muy notorias en todo el estudio y en los valores finales de tiempo de retorno, los cuales son el punto de partida para los modelos numéricos de simulación hidrodinámica.

4.5.2. SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA- CON HERRAMIENTA IBER

En este trabajo de investigación se apunta a comprender como es la interacción entre la ciudad de Chaitén y el río Blanco en un contexto de crecidas de gran magnitud. En este sentido, para este fin utilizaremos programas computacionales de modelación numérica.

Este método consiste en predecir los valores que toman las variables hidráulicas (calados, velocidades, caudal, etc.) a partir de métodos numéricos de ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis (Blade, 2012). Para este tipo de problemas, se pueden utilizar modelos unidimensionales o bidimensionales, sin embargo, a la necesidad de estudiar fenómenos cada vez más complejos, sumado al aumento de velocidad de los ordenadores, ha llevado a un mayor uso de ecuaciones y esquemas bidimensionales (Blade, 2012).

Actualmente existen diversos programas bidimensionales que modelan crecidas (Mike-21, Sobek o TufLOW2D), no obstante, para este trabajo se utilizó Iber. Este software es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado a partir de la colaboración de una gran cantidad de grupos de trabajo en diferentes universidades, el cual fue desarrollado para resolver un gran espectro de campos de estudio de la hidrodinámica de las avenidas, como la simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales, cálculo hidráulico de encauzamientos, entre otros (Blade, 2012). Las ecuaciones utilizadas en Iber fueron: para el módulo de hidrodinámica la fórmula de Saint-Venant y para el módulo de sedimento la ecuación de Exner.

5. METODOLOGIA

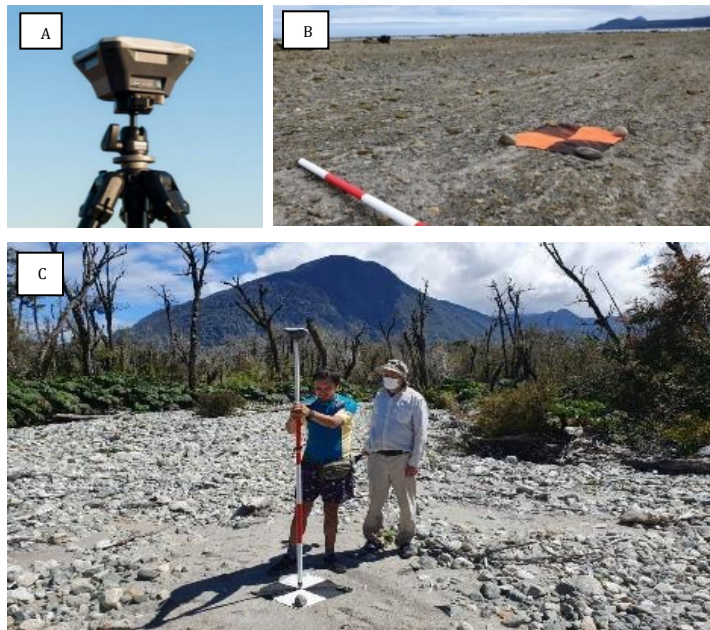
La metodología empleada en el presente trabajo de investigación corresponde a una metodología de tipo cuantitativo, la cual permitió a través de la recolección de datos y de la implementación de modelos, analizar el riesgo específico por inundaciones en el casco urbano de Chaitén. A continuación, se presenta la metodología implementada en este estudio.

5.1. LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

En el marco del proyecto Sedimpact, se realizó un levantamiento fotogramétrico con dron en la ciudad de Chaitén, con la finalidad de generar un Modelo Digital de Elevación y una reconstrucción 3d, la cual permitió realizar la simulación de un escenario de inundación extremo. Los equipos utilizados fueron un dron Mavic 2 pro y GPS diferencial de la marca EMLID modelo REACH RS+.

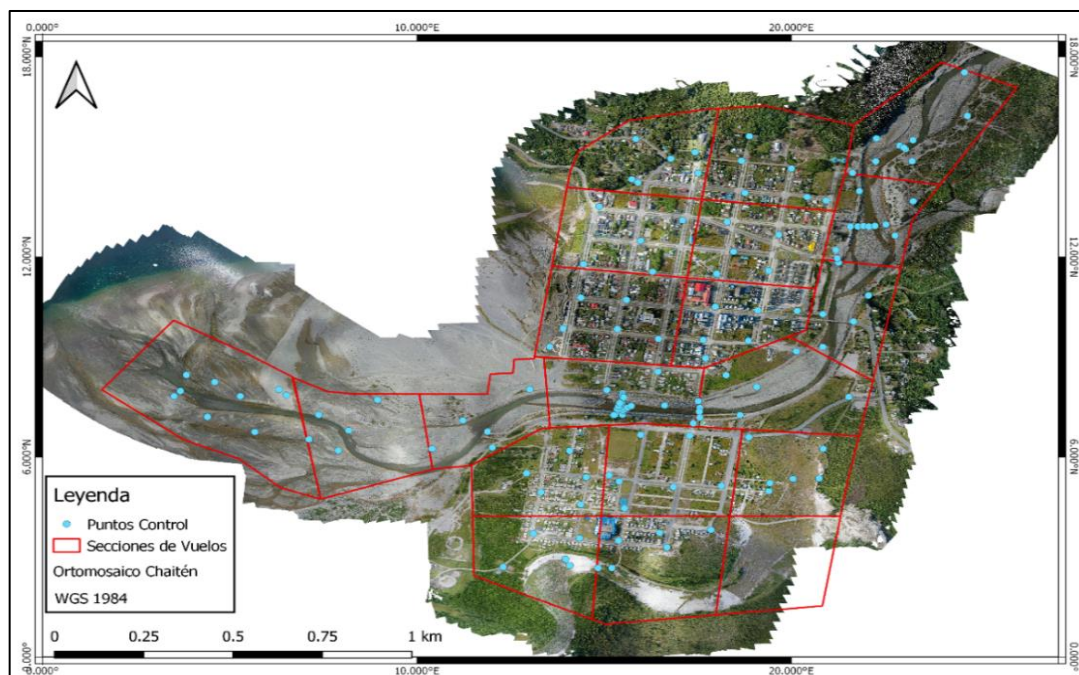
Para llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico, en primer lugar, se seleccionó el área de interés, la cual corresponde al río Blanco y la zona urbana de Chaitén. Debido a que los vuelos del dron tienen una duración de 30 min aprox. por batería, se decidió subdividir el área de interés en parcelas de 15 ha, para obtener una resolución aproximada de 5cm/pix. En cada una de las parcelas se realizaron 3 vuelos con distintos ángulos de cámara, para poder generar una mejor reconstrucción en 3d (James y Robson, 2014). Para mejorar la precisión de la reconstrucción en el procesamiento de imágenes, se utilizaron puntos de control en tierra (GPD) (Segoni et al., 2018). En cada una de las zonas, se utilizaron 5 puntos distribuidos en el polígono de interés. Además, en el río se realizaron secciones transversales para ajustar la profundidad del río en la reconstrucción.

Figura 7. A) Modelo de GPS de la marca EMLID. B) Puntos de control en tierra. C) Investigadores adquiriendo datos de puntos de control en tierra



Fuente. Elaboración propia

Figura 8. Cartografía de Chaitén, que muestra las zonas de vuelo que se realizaron y los distintos puntos de Control utilizados en la Reconstrucción fotogramétrica



Fuente. Elaboración propia.

Para el procesamiento de las imágenes obtenidas con el dron, se utilizó el software Agisoft Metashape (Li et al., 2016). Se utilizaron un total de 7000 imágenes, procesadas en un computador con procesador Intel Core i5-9600K con 48 GB de memoria RAM. El flujo de trabajo utilizado fue la orientación de las imágenes tomadas por el dron, el identificar los puntos de control en tierra dentro de las imágenes obtenidas. Con ello, se realiza una posterior calibración de las cámaras a partir de los GPD. Se generó una nube de puntos densa utilizando los parámetros de alta calidad, obteniendo 1.406.797.741 puntos. A partir de la nube de puntos densa, se realizó el DEM y el posterior ortomosaico. El promedio de los puntos de control en x es 44.40 cm, en y 60.67 cm y, por último, en z de 32.77 cm.

5.2. SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

El modelo Iber consta de diferentes módulos de cálculo acoplados entre sí. En su primera versión se incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos, de granulometría uniforme, por carga de fondo y por carga en suspensión (Blade, 2014). Para el funcionamiento de Iber es necesario establecer los datos base de la modelación para que, una vez estén integrados en el proyecto, se puedan establecer las condiciones de contorno (agua, sedimento y madera) y así poder determinar los escenarios críticos que en este trabajo se busca estudiar.

5.2.1. CONDICIONES INICIALES

A) Topografía

A partir del levantamiento fotogramétrico anteriormente mencionado, se obtuvo un modelo digital de terreno de la ciudad de Chaitén y sus alrededores, con un tamaño de pixel de 0.2 m, y una extensión para la malla de cálculo de 1.28 km². Sin embargo, dado que el modelo de elevación digital contaba con una gran extensión y una alta resolución, se redujo la zona de estudio y se agrandó el tamaño de pixel, para así evitar una sobrecarga de información en los modelos de simulación hidráulica y reducir los tiempos de cálculo. Por otro lado, el DEM tenía una gran cantidad de irregularidades en el terreno, así como el puente, las viviendas, árboles, arbustos y autos dentro de la ciudad, los cuales fueron limpiados y corregidos con programas SIG (QGIS y SAGA).

B) Granulometría

Se utilizó el método fotogramétrico para analizar la granulometría. Para esto se tomaron 11 fotografías a través del cauce con el dron Mavic Pro con el fin de que estén geo-referenciadas. Con estas imágenes se midió y cuantificó la cantidad de elementos existentes en cada una de las fotografías con los softwares Digital Gravelometer (Graham, 2005), Split y BaseGrain (Detert y Weitbrecht, 2013), con los cuales se obtuvo la curva granulométrica de cada una de las fotografías para así tener un valor final ponderado de todas las imágenes. En este caso, el diámetro medio obtenido para BaseGrain y Split fue de 41.5 mm mientras que para Digital Gravelometer fue de 38.5 mm, promediando un valor de 40.5 mm.

C) Rugosidad

El coeficiente de rugosidad (CR) es uno de los parámetros más importantes a considerar para el desarrollo de las simulaciones hidrodinámicas. Para definir el valor de rugosidad del río se consideró las tablas propuestas por Benson & Dalrymple (1967), esta elección se debe a que han sido utilizadas por múltiples investigadores, tales como Jarret (1985), Arcement & Schneider (1989) y Aldrige y Garret (1973). Para las zonas de la planicie de inundación se complementó entre la metodología ya usada y la de Chow (1959). Los valores utilizados se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning (N_b)

Cauce activo	
Tipo de modelo	<i>2D</i>
Uso de suelo	
Río	0,048
Enrocado	0,08
Calles	0,014
Residencial	0,2
Bosques	0,25
Depósitos de ceniza	0,02
Praderas	0,025
Suelos desnudos	0,02

Fuente. Elaboración propia.

D) Estructuras

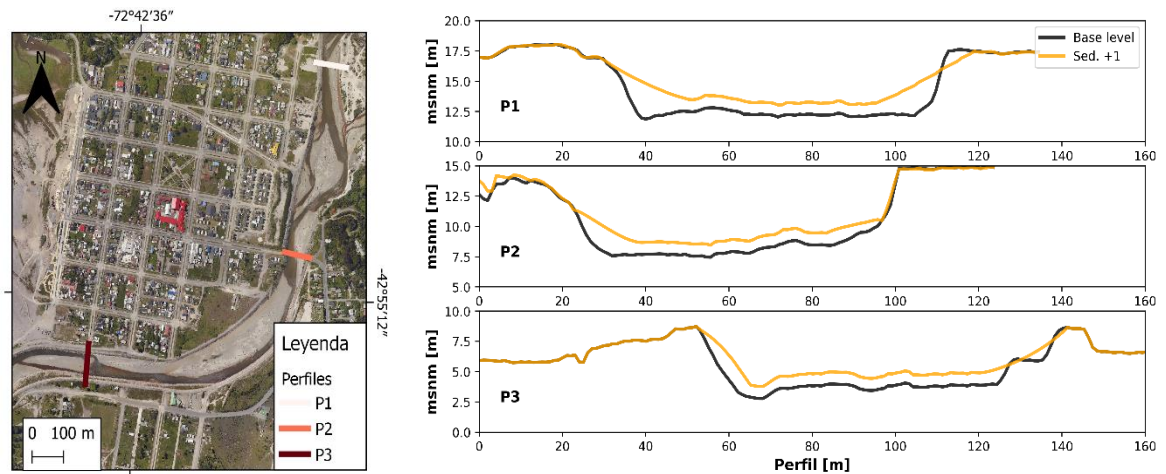
Las estructuras fueron definidas en relación con la interacción con el flujo y fueron integradas en la malla de cálculo. En este sentido, se pueden identificar 2 conjuntos de estructuras principales: el puente, y las viviendas. El puente fue definido como el tablero y los pilares dentro de la malla. Los pilares fueron definidos en la malla como espacios vacíos, sin ninguna condición de entrada ni salida, por lo cual Iber los entiende como una pared. En el caso del tablero fue definido a través de las herramientas internas de Iber que se encuentran en la sección Datos>Hidrodinámicas>Estructuras>Puente. Las estructuras fueron insertadas en la malla a través de anillos en la geometría que fue utilizada en el proyecto de Iber. Fueron contabilizadas 715 edificios en el área de interés.

5.2.2. CONDICIONES DE CONTORNO Y ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Escenario de flujos de gran magnitud

Dada la poca información hidrológica existente y en vistas de que cada uno de los trabajos realizados difieren entre sí en los resultados, se propuso para este trabajo desarrollar un escenario de inundación de gran magnitud que: a) supere considerablemente los valores de caudal resultante para los trabajos ya mencionados, es decir, tenga un tiempo de retorno de 200-300 años y b) esté en un contexto de afectación por volcanismo. Es por ello que, se estableció un valor de caudal entrante de 700 m³/s para el río Blanco y 50 m³/s para el río Chai-Chai (tributario). Además de esto, se definieron condiciones base sobre el cauce del río, en las cuales todo el lecho del río presente un aumento de 1 metro (Figura 9), simulando una acumulación excesiva de material volcánico que aumente el nivel base del río, de forma similar a lo ocurrido en el año 2008.

Figura 9. Aumento en el nivel del lecho del río. A la derecha se encuentra una imagen aérea con la posición de los perfiles. En la imagen de la izquierda muestra la diferencia entre la condición base y el escenario considerado para este trabajo

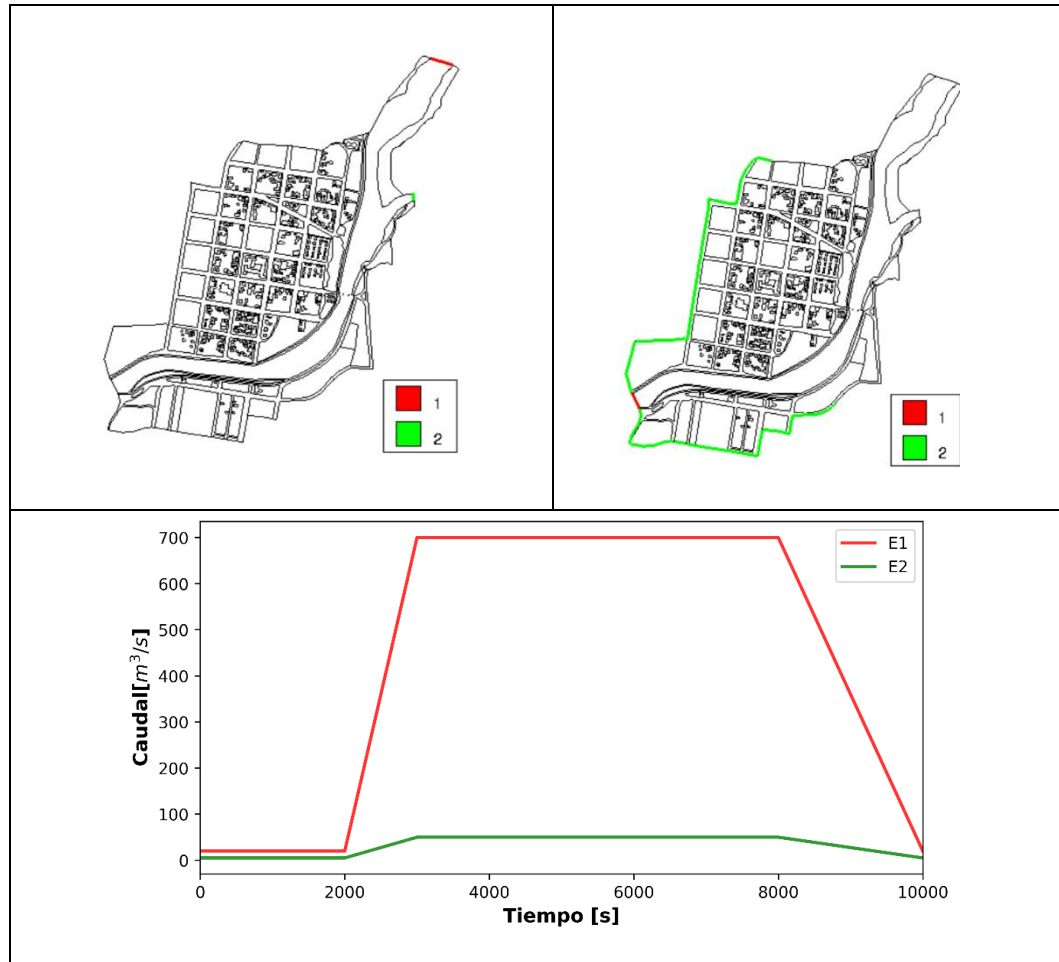


Fuente. Elaboración propia.

Calculo hidrodinámico

Con todas las condiciones iniciales definidas, se avanzó a la siguiente fase de este trabajo, el cual consistía en integrar las condiciones de contorno y al cálculo del proyecto. En primer lugar, se definió el tiempo total de modelación, el cual fue de 10000 segundos. Por ende, el hidrograma entrante debía tener esa misma cantidad de tiempo. Se definieron 2 entradas, una para el río Blanco y otra para el río Chai-Chai (Ver Figura 10). Las salidas se definieron como un nivel base, es decir, como un nivel de marea que mantuvo igual durante toda la simulación. Para la salida del río Blanco por el enrocado (salida 1), se consideró un valor 1, mientras que para todo el resto (Salida 2) un valor 0. Ya con todo esto definido, se puso en marcha el proyecto y se calculó el comportamiento del flujo en la ciudad.

Figura 10. Condiciones de contorno del proyecto. Los paneles superiores son las condiciones de entrada y de salida (izquierda y derecha) y el panel inferior es el hidrograma ingresado



Fuente. Elaboración propia.

5.3. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD FÍSICA DE LAS VIVIENDAS

La vulnerabilidad física estructural está determinada por la intensidad del impacto y la susceptibilidad estructural de los elementos en riesgo, con un rango de 0 (Sin daño) y 1 (Destrucción total) (Holub et al., 2012). Para evaluar la vulnerabilidad, se implementó como base el enfoque basado en indicadores abordado por Papathoma-Köhle et al. (2019). Para la construcción del índice de vulnerabilidad se seleccionó, ponderó y agregó cada uno de los indicadores. El método de selección y ponderación utilizado fue el método Analítico

Jerárquico (AHP), desarrollado por R. Saaty durante la década del 70 (Saaty, 1987). Posteriormente, se elaboró un inventario, con la finalidad de recolectar por cada una de las viviendas los indicadores que influyen tanto en la susceptibilidad de las viviendas (SV) como en el modelo de proceso (MP) de inundación. Se recopilieron indicadores para 70 viviendas, dispuestas en 4 zonas de alto peligro.

5.3.1. PONDERACIÓN DE INDICADORES DE VULNERABILIDAD FÍSICA A PARTIR DEL MÉTODO AHP

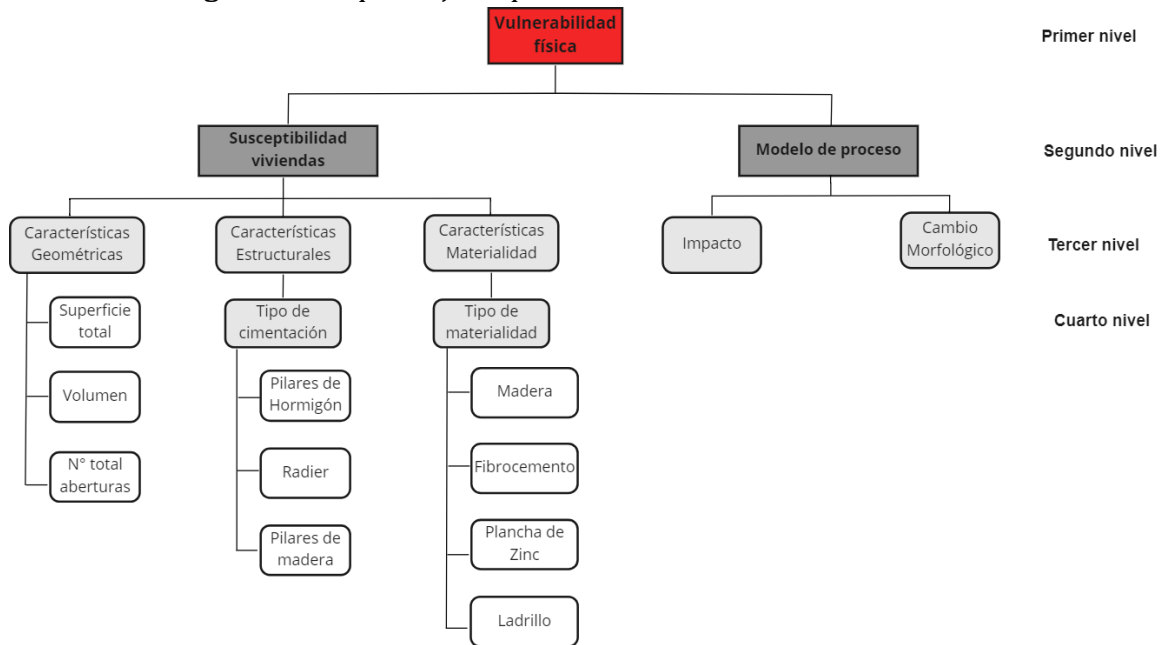
Para evaluar la vulnerabilidad física de las viviendas se aplicó el método de criterios múltiples denominado Analítico Jerárquico (AHP), el cual permite analizar y resolver problemas complejos a través del juicio subjetivo de expertos. Esta técnica va desagregando problemas complejos en jerarquías de elementos, logrando identificar sus objetivos, criterios y subcriterios (Atanasova-Pachemska et al., 2014). Una vez identificados, se realiza una comparación por pares entre los criterios y subcriterios, asignándole una calificación que varía de 1 a 10 dependiendo en nivel de importancia o influencia que tenga el uno sobre el otro (Ibrahim et al., 2018). En el caso de esta investigación, la calificación asignada para cada uno de los criterios fue asignada a partir de la conformación de una mesa de expertos, compuesta por 9 profesionales pertenecientes al proyecto SEDIMPACT. Los expertos poseen experiencia en investigaciones en riesgos naturales y conocimiento de la zona de estudio.

Para la implementación de este método, se utilizó la plantilla Excel AHP con múltiples entradas del autor Klaus Goepel (2013). La plantilla está compuesta por 1 hoja de resumen con los resultados, 20 hojas de entrada de comparaciones por pares, 1 hoja para la consolidación de todos los juicios y, por último, 1 hoja con tablas de referencia. En la hoja de resumen se pueden observar los valores de las ponderaciones de cada uno de los criterios analizados, los errores absolutos generados en las comparaciones y también, el índice de consenso entre los expertos, el cual varía de 0 a 100%.

Para llevar a cabo este procedimiento, en primera instancia, se elaboró un esquema general del problema (figura 11), el cual está compuesto por cuatro niveles jerárquicos. El primer nivel jerárquico corresponde a la vulnerabilidad, el segundo es la susceptibilidad de las viviendas y el modelo de proceso, el tercer nivel son las características geométricas, estructurales y de materialidad, además, de impacto y cambio morfológico, y el último nivel corresponde al tipo de cimentación y de materialidad de las viviendas. La determinación de cada uno de los niveles que conforman el esquema general permitió la aplicación de un total de 6 plantillas AHP, las cuales fueron evaluadas por los 9 expertos. Las plantillas evaluadas

fueron: primer nivel vulnerabilidad; segundo nivel: modelo de proceso, susceptibilidad vivienda; tercer nivel: características geométricas, estructurales y de materialidad; cuarto nivel: tipo cimentación y materialidad

Figura 11. Esquema jerárquico Vulnerabilidad física estructural



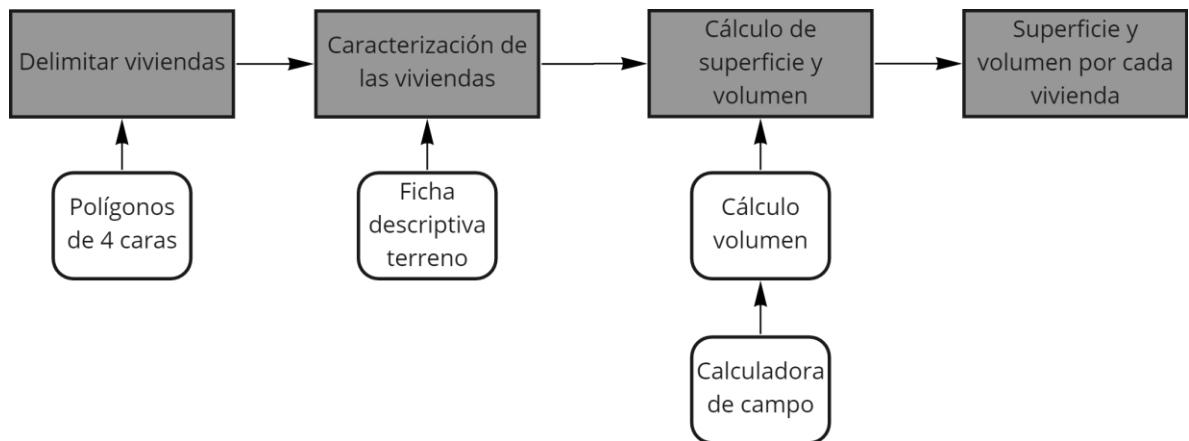
Fuente. Elaboración propia.

5.3.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS VIVIENDAS

La susceptibilidad de las viviendas obedece a las propiedades físicas que estas presenten, por tanto, los indicadores que componen el inventario son: superficie total, volumen, número total de aberturas, tipo de cimentación y tipo de materialidad. Para la elaboración del inventario (figura 12), en primer lugar, se delimitaron las viviendas a partir del orto mosaico obtenido en la modelación 3D. Este procedimiento se realizó a una escala 1:180, mediante el software Qgis 3.18. Con la finalidad de facilitar el proceso metodológico, se limitó las geometrías de las viviendas a polígonos de cuatro caras, extendiendo sus fachadas en sentido horario, de A a la D.

El segundo paso fue caracterizar las viviendas expuestas del área estudiada. Para ello, se implementó durante trabajo de campo una ficha descriptiva de las viviendas (tabla 4). Por último, se calculó la superficie de las viviendas a partir de la calculadora de campo. En el caso del volumen, se utilizó el complemento Cálculo de volumen, el cual permite extraer los valores a partir la capa shapefile de viviendas y un DEM de la ciudad de Chaitén.

Figura 12. Flujo metodológico susceptibilidad de las viviendas



Fuente. Elaboración propia.

Cada uno de los datos del inventario, fueron recopilados en un archivo Excel para posteriormente ser añadidos mediante la herramienta Join de QGIS 3.18 en la tabla de atributos del shapefile de viviendas.

Tabla 4.Resumen formulario ficha descriptiva

Variables	Características
Tipo cimentación	Pilares de Hormigón Radier Pilares de madera Otro
Materialidad fachadas	Madera Fibrocemento Planchas de Zinc Ladrillo Otro
Estado de conservación envoltura	Impecable (Bien conservadas, sin grietas ni fisuras) Moderado (Se ven grietas o fisuras no estructurales) Deteriorado (Se ven grietas, estructura interna y mal estado de materiales)
Continuidad envoltura	Continua (1 material) Parcial (2 o más materiales)
Número de puertas y ventanas	-
Superficie aprox. de ventanas (m ²)	-
Tipo de uso de la estructura	Habitacional Recreacional Institucional

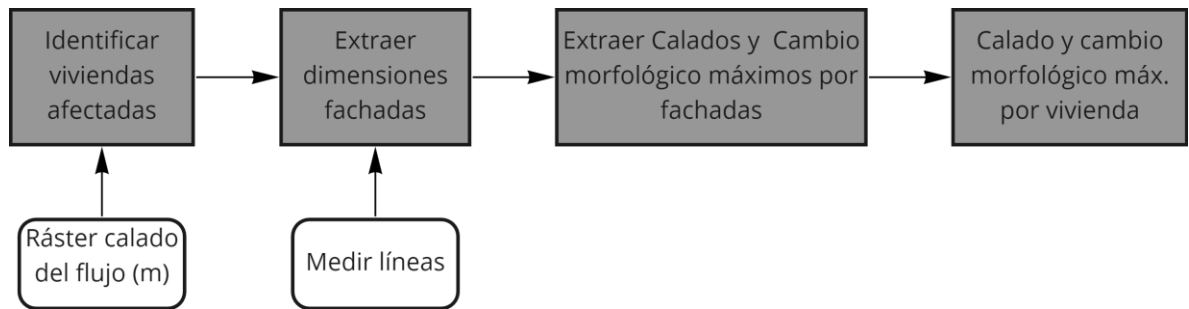
Fuente. Elaboración propia.

5.3.3. MODELO DE PROCESO

Para el análisis del modelo de proceso, cómo se mencionó en el apartado anterior, se realizó una simulación hidrodinámica de crecida máxima con un caudal de 700 m³/s en el río Blanco más 50 m³/s en el río tributario Chai Chai, además de 1 m de sedimentación en el lecho del río. Este es un escenario de gran magnitud, con un tiempo de retorno aproximado de entre 200 a 300 años y bajo un contexto de afectación por volcanismo. Es preciso recalcar que, todos los procedimientos metodológicos y resultados son condicionados a la ocurrencia de este escenario.

A partir de esta simulación se obtuvo los datos hidráulicos de: calado, velocidad, cambio morfológico, entre otros.

Figura 13. Flujo metodológico modelo de proceso



Fuente. Elaboración propia.

Para identificar el número de viviendas expuestas al flujo, se utilizó la herramienta Estadísticas de Zonas Qgis 3.18, la cual a partir del ráster de calado y el shapefile de viviendas, extrae las profundidades del flujo en sus cercanías. Las viviendas consideradas como expuestas fueron aquellas afectadas por un calado igual o mayor a 0.1 metros, dado a que una profundidad menor no generaría grandes daños en las viviendas. Luego, se midieron cada una de fachadas a partir del shapefiles de viviendas creado anteriormente.

Para extraer los calados y cambios morfológicos de cada una de las fachadas de las viviendas, se siguieron los siguientes pasos: 1) Poligonizar ráster de calado y cambio morfológico, 2) Convertir polígonos de viviendas a líneas, 3) Separar líneas (Explode líneas), 4) Seleccionar por localización, 5) Extraer datos seleccionados, 6) Crear ID fachadas en capa de líneas de viviendas, 7) Unir por localización, 8) Agrupar datos en Python, 9) Unir archivos CSV en capa líneas viviendas. Debido a que el cambio morfológico presenta valores negativos (sedimentación) o positivos (erosión), se escogió el valor absoluto más alto por fachadas y luego se identificó a que proceso correspondía. Tras identificar los valores máximos de cambios morfológicos por fachadas, se seleccionaron los valores máximos por vivienda.

5.3.3.1. CUANTIFICACIÓN DE IMPACTO

Para cuantificar el impacto del flujo en las fachadas de las viviendas, se implementó la fórmula de Fuerza Normal Específica propuesta por Sturm et al. (2018):

$$f = 4.47492 * h + 2.29447 * h^2$$

Donde f es la fuerza normal específica en kN m^{-1} y h es la altura de flujo que se aproxima directamente al elemento de pared en metros. Es importante señalar que, los resultados obtenidos fueron convertidos a N/m^2 . Tras convertirlos, se seleccionaron los valores máximos de impacto por vivienda. Estos últimos datos fueron los utilizados durante el trabajo de investigación.

5.3.4. ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDAD FÍSICA

Para elaborar la cartografía de vulnerabilidad física se añadieron los pesos ponderados de los indicadores en los inventarios de susceptibilidad de las viviendas y modelo de proceso. Para aquellos indicadores que no fueron categorizados previamente, es decir, superficie total, volumen, número total de aberturas, impacto de la Fuerza Normal Específica y cambio morfológico, se realizó una normalización sus datos. En el caso de las variables de modelo de proceso se normalizaron los valores máximos previamente seleccionados y para las variables de susceptibilidad de las viviendas, se llevó a cabo directamente.

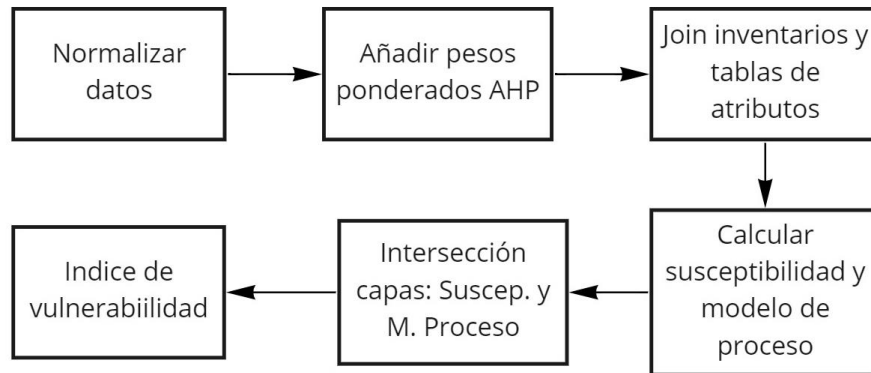
Una vez añadidos los pesos, se procedió a unir la información contenida en los inventarios con las tablas de atributos de las respectivas capas de susceptibilidad e impacto. Para integrar cada una de las distintas variables y subvariables, se realizó una suma lineal Ponderada mediante la siguiente expresión:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (4)$$

Donde, r_i es la variable ponderada definida como objetivo, w_j es el peso del criterio o factor y v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio o factor j .

Al obtener el índice de vulnerabilidad por cada una de las viviendas, se utilizó el método de clasificación “Cuantil”, es decir, cada clase contiene el mismo número de características (Papathoma- Köhle et al., 2019).

Figura 14. Flujo de trabajo de la cartografía de la vulnerabilidad



Fuente. Elaboración propia.

5.4. DAÑO ESPERADO PARA UN ESCENARIO ESPECÍFICO DE RIESGO POR INUNDACIONES

El daño esperado para el escenario de crecida extrema se cuantificó a partir de la multiplicación entre el índice de vulnerabilidad evaluado en el apartado anterior y el valor de reconstrucción de las viviendas. Para el valor de reconstrucción se considera la construcción de una vivienda con características similares a antes de ser impactada. Para calcular este factor, se definió el escenario más desfavorable, es decir, pérdida total. En el caso de aquellos materiales que ya no son vendidos, se substituyó por el material más utilizado en el área estudiada.

A continuación se observa la ecuación propuesta por Gallerani et al. (2011) para calcular el valor el NV (Mazzorana et al., 2012).

$$NV = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij} * p_{ij} \quad (5)$$

Donde NV corresponde al Valor de Reconstrucción, q_{ij} es la unidad requerida j para realizar la unidad del flujo de trabajo de construcción i , p_{ij} es el precio unitario de la unidad de flujo de trabajo de construcción (Mazzorana et al., 2012).

En este caso, para calcular el NV se consideró el tipo de cimentación, la materialidad de las fachada y el valor de la mano de obra, la cual se estimó en \$250.000 el m². Para identificar estos factores, se utilizaron las imágenes levantadas durante trabajo de campo. Se generaron dos tablas con los materiales utilizados, las medidas y el precio unitario del producto (tabla 4 y 5).

Tabla 5. Medidas y precios unitarios de materiales de cimentación

Materiales de cimentación	Medidas	Imagen	Precio unitario
Pilares de hormigón	20 x 50 cm		\$6.040
Pilares de Madera	3.20 x 0.152 m		\$36.190
Radier	1m3 Tipo: HN200902008		\$120.433

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Medidas y precios unitarios de materiales de fachadas

Materiales Fachadas	Medidas	Imagen	Precio unitario
Madera	Smart Panel Ancho 1,22 m Alto 2,44 m		\$33.690
	Cielo Pino Largo: 3,2 m Ancho:0,1 m		\$1.990
	Pino Cepillado Largo: 3,2 m Ancho: 0,254 m		\$6.890
	Madera Pino Forro Cabaña Largo: 3,2 m Ancho:0,1 m		\$2.790
	Cantoneras de Madera Largo: 3,2 m Ancho: 0,2 m		\$1.600
Fibro cemento	Largo: 3,66 m Ancho: 0,19 m		\$6.090
Plancha de Zinc	Largo: 2,50 m Ancho: 0,895 m		\$13.950

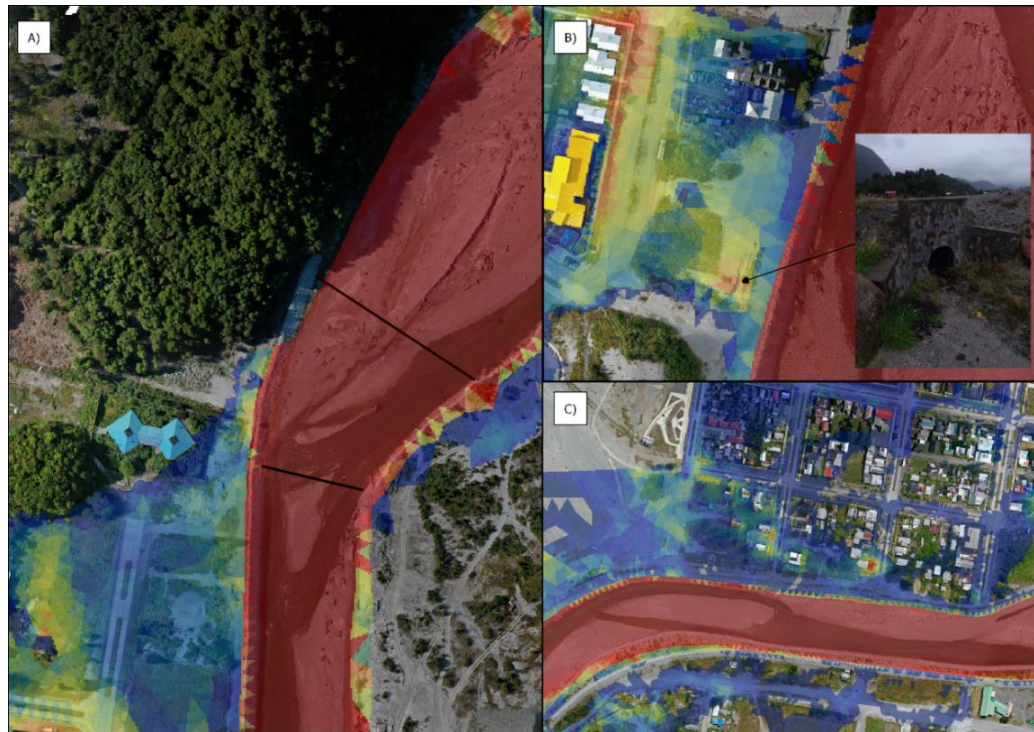
Fuente. Elaboración propia.

6. RESULTADOS

6.1. EXPOSICIÓN DEL ÁREA URBANA DE LA CIUDAD DE CHAITÉN

Los datos arrojados por las simulaciones hidrodinámicas para un escenario específico de 750 m³/s, indican que 253 edificios son afectados por calados mayores a 0.1 m. La inundación abarca principalmente Chaitén Norte, dado a que corresponde al punto de inicio del desbordamiento donde el enrocado es sobrepasado por el flujo como consecuencia de la disminución del ancho del cauce activo (figura 15a) y del aumento de la sedimentación en el lecho del río. A medida que el flujo avanza, se observa un punto de desbordamiento, el cual se produciría debido a la existencia de salidas de alcantarillados (figura 15b). Si bien los alcantarillados no fueron considerados durante las modelaciones hidrodinámicas, es importante mencionarlas puesto que son estructuras que facilitan el movimiento del flujo. El flujo se encauza y fluye por las calles de Chaitén Norte hasta llegar al sur de esta zona y desembocar en el mar. Es aquí en donde también se produce un ingreso de agua (figura 15c), el cual se podría asociar a dos factores. El primero correspondería a un sobrepaso del enrocado debido a la disminución de sus dimensiones al llegar al delta y el segundo, debido a la posible incertidumbre generada en las simulaciones hidrodinámicas, dado a que esta zona es considerada como condición de salida del flujo.

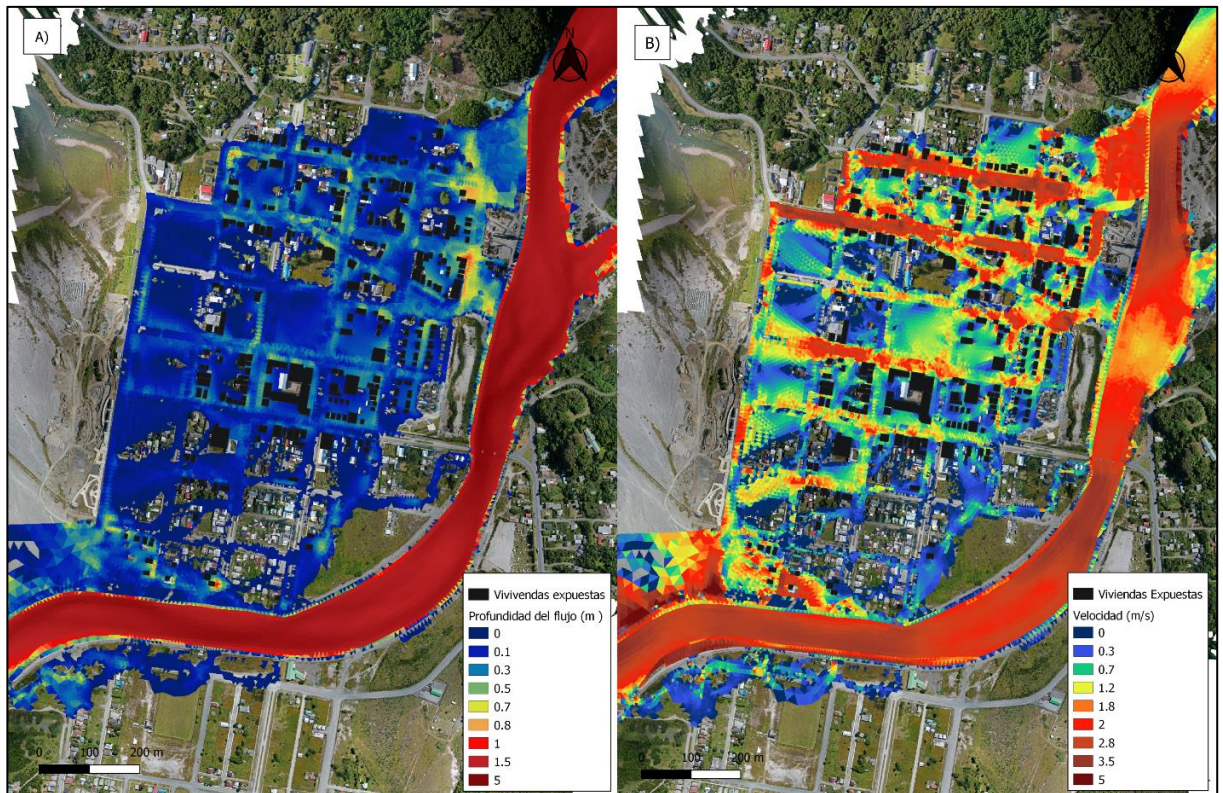
Figura 15. Zonas de desbordamientos de inundación en zona urbana. A) Disminución del ancho del cauce activo, B) Alcantarillado, C) Desbordamiento desembocadura



Fuente. Elaboración propia.

Cómo se puede observar en la cartografía de profundidades del flujo (figura 16a), el sector que presenta mayores calados se ubica en las cercanías del río Blanco (noreste) con valores que varían entre los 0.7 y 0.9 m aproximadamente. Otros sectores que presentan valores altos son la zona noroeste de la ciudad y en la desembocadura del río donde las profundidades alcanzan hasta los 0.8 m. El resto de la ciudad presentan valores que oscilan entre los 0.1 y 0.5 m, exceptuando el borde costero con valores despreciables. Si bien las alturas de flujo en el resto de la ciudad son relativamente bajas, estas pueden ocasionar mecanismos de daños como intrusión de agua en las edificaciones. En la figura 16b, se muestra que las velocidades son altas, llegando en algunos sectores incluso a los 2.8 m/s. Las zonas con alta velocidad se ubican en el río y en las primeras calles del sector norte de la ciudad. Dichos valores pueden provocar severos daños en las edificaciones y estructuras presentes, así como también ser un inminente riesgo para los habitantes.

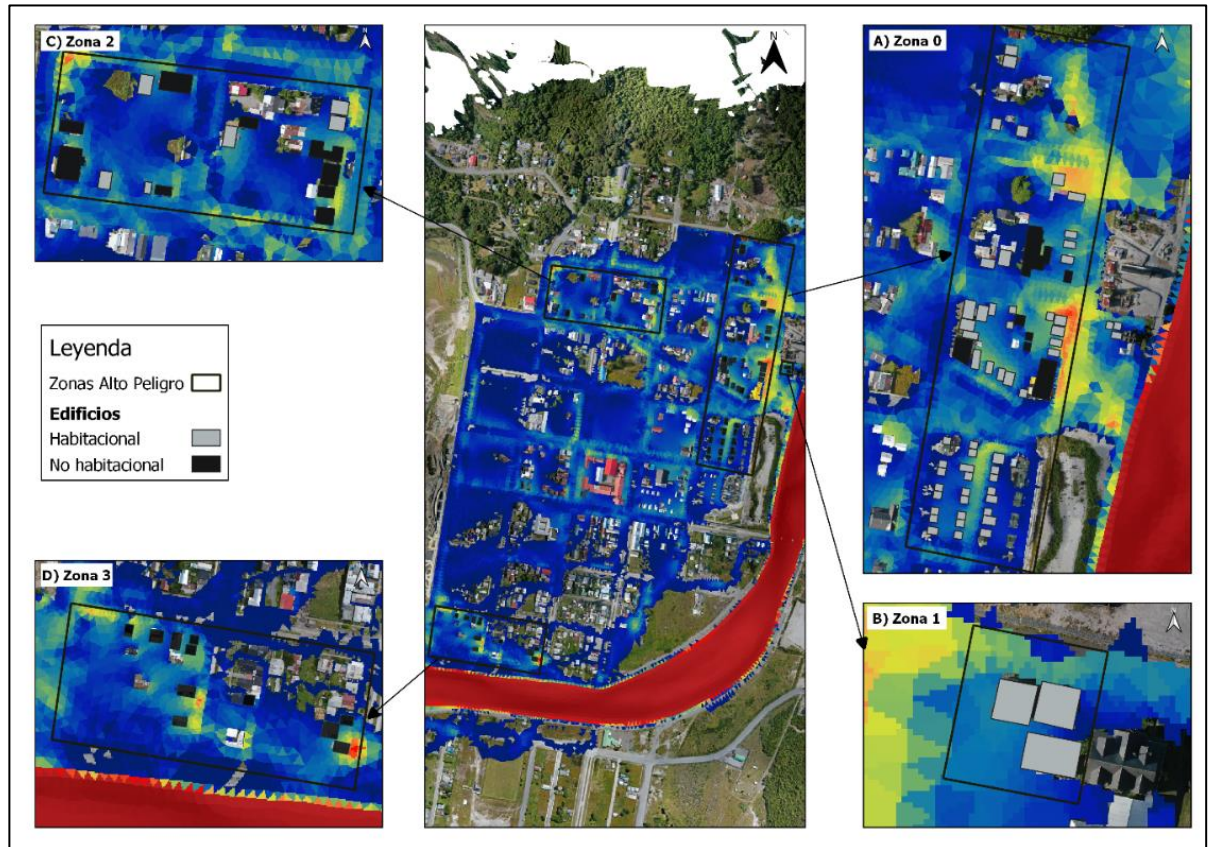
Figura 16. A) Cartografía de profundidades del flujo (m) y B) Cartografía de velocidades del flujo (m/s)



Fuente. Elaboración propia

El paso del flujo por el entorno construido permite identificar al menos cuatro zonas de mayor peligro (figura 17): zona 0, 1, 2 y 3. Estas áreas comprenden un total 90 edificios, de las cuales 70 son tipo de uso habitacional y 20 corresponden a usos no habitacionales, entre ellos edificios institucionales. La zona 0 se ubica al noreste de Chaitén Norte desde la calle Norte a la altura de la cárcel hasta Pedro Aguirre Cerda y abarca un total de 50 viviendas. La segunda zona se localiza en las cercanías del río en la intersección entre las calles río Blanco y Cesar Ercilla y se compone por 3 viviendas. La zona número 2 está al noroeste, entre las calles Arturo Prat y Padre Juan de Toderco y presenta 6 edificios habitacionales. Por último, la zona 3 se ubica en las cercanías del delta en calle Lautaro con 10 viviendas.

Figura 17. Zonas de Alto peligro. A) Zona 0, B) Zona 1, C) Zona 3, D) Zona 4



Fuente. Elaboración propia.

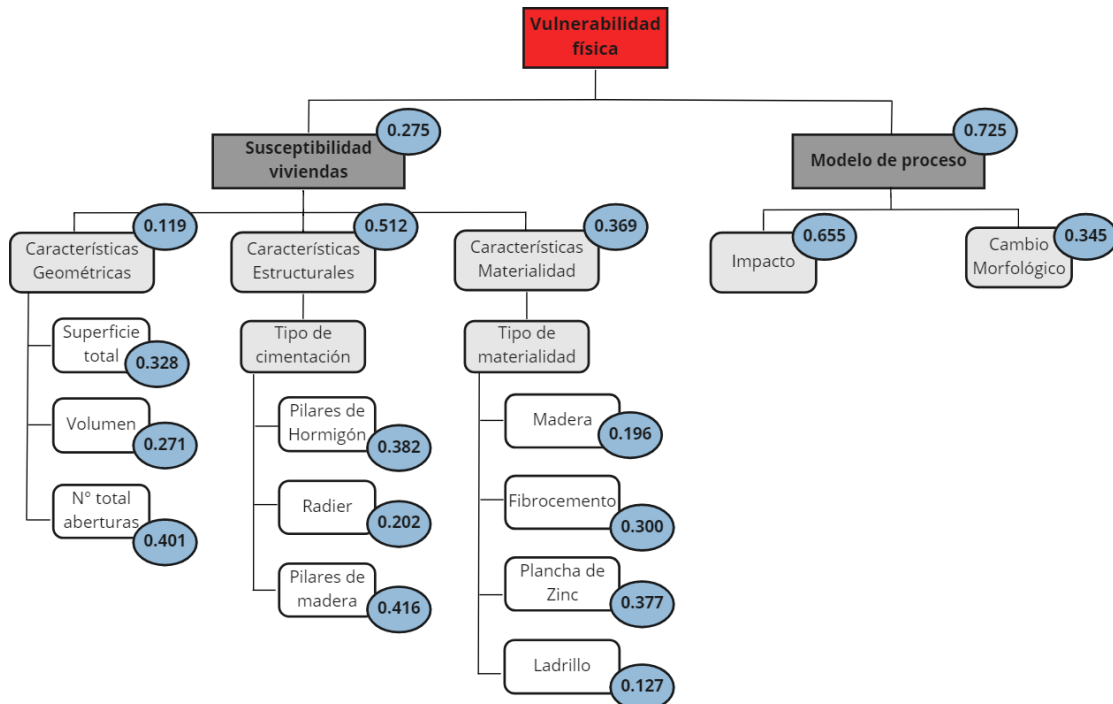
6.2. EVALUACIÓN VULNERABILIDAD FÍSICA DE LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES

La simulación hidrodinámica permitió identificar que 70 viviendas se encuentran ubicadas en zonas de alto peligro, las cuales fueron analizadas en mayor profundidad durante el desarrollo de esta investigación. La vulnerabilidad física de las viviendas expuestas se evaluó a partir del método basado en indicadores. Estos indicadores fueron seleccionados y ponderados a través del método Analítico Jerárquico. Es por ello que, antes de presentar los resultados obtenidos de la evaluación de la vulnerabilidad es preciso mencionar los pesos ponderados asignados por los expertos para cada uno de los indicadores.

6.2.1. PONDERACIÓN DE LOS INDICADORES DE VULNERABILIDAD FÍSICA MEDIANTE AHP

A continuación, se observan los resultados del juicio realizado por los expertos para cada uno de los indicadores utilizados en la cuantificación de la vulnerabilidad (figura 18). Los indicadores con pesos altos poseen una mayor importancia en la vulnerabilidad física de las viviendas expuestas y los indicadores con valores bajos influyen en menor medida. Según los expertos, el indicador de Modelo de proceso (0.725) influye más en la vulnerabilidad que la susceptibilidad de las viviendas (0.275). Por un lado, en el modelo de proceso el indicador que posee un mayor peso es el impacto con 0.655 y luego, el cambio morfológico con 0.345. Por otro lado, la susceptibilidad de las viviendas se compone de las características geométricas (0.119), de materialidad (0.369) y estructurales (0.512), siendo esta última la más alta. Las características geométricas se categorizan en superficie total (0.328), volumen (0.271), número total de aberturas (0.401). El peso asignado para los subcriterios de las características estructurales (tipo de cimentación) son pilares de hormigón (0.382), radier (0.202) y pilares de madera (0.416). Por último, las características de materialidad (tipo de materialidad) se clasifican en madera (0.196), fibrocemento (0.300), plancha de zinc (0.377) y ladrillo (0.127).

Figura 18. Esquema vulnerabilidad física con pesos ponderados



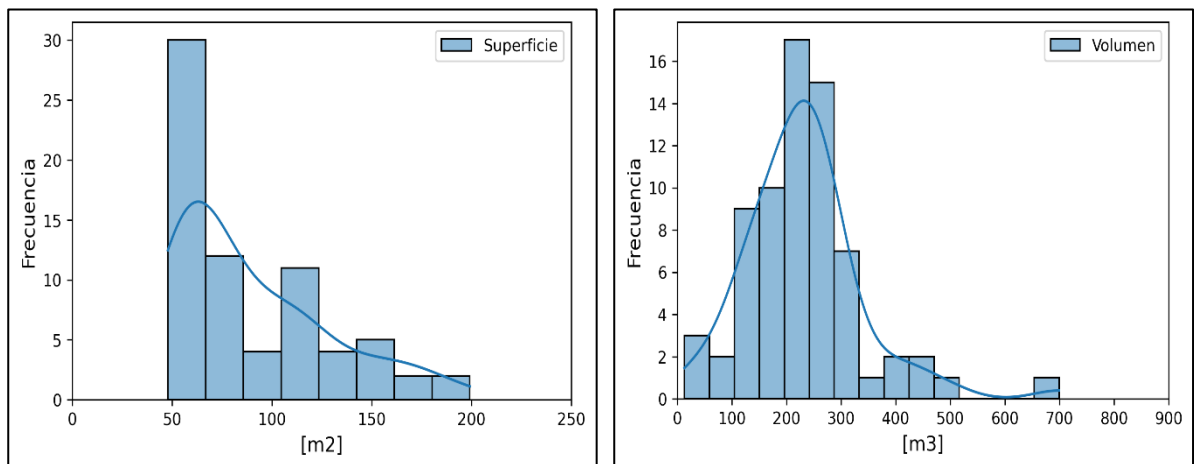
Fuente. Elaboración propia.

6.2.2. SUSCEPTIBILIDAD DE LAS VIVIENDAS

La susceptibilidad representa la propensión de las viviendas a sufrir daños dadas sus propiedades físicas. A partir de ello, el análisis realizado arrojó valores de susceptibilidad de las viviendas que oscilan entre los 0.203 y los 0.419, localizándose los valores más altos en la zona 2 y 3. Los valores arrojados indican el predominio de algunas propiedades físicas que presentan las viviendas. A partir de estas, se procedió a caracterizarlas.

Como se puede ver en la figura de la izquierda (figura 19) las viviendas afectadas presentan superficies que van desde los 47.9 a los 199.18 m², presentando una mayor frecuencia entre los 47.9 y los 78.52 m². El resto de los valores son cada vez menos frecuentes, especialmente desde los 160 m². Por tanto, se interpreta que un gran número de viviendas afectadas presentan superficies bajas. Para el caso del volumen estas van desde los 13 a los 699.3 m³, con un mayor número de viviendas entre los 110 y los 268 m³ aproximadamente. También, se observa valores anómalos de 700 m³.

Figura 19. Histograma de superficie (izquierda) y volumen (derecha) de las viviendas



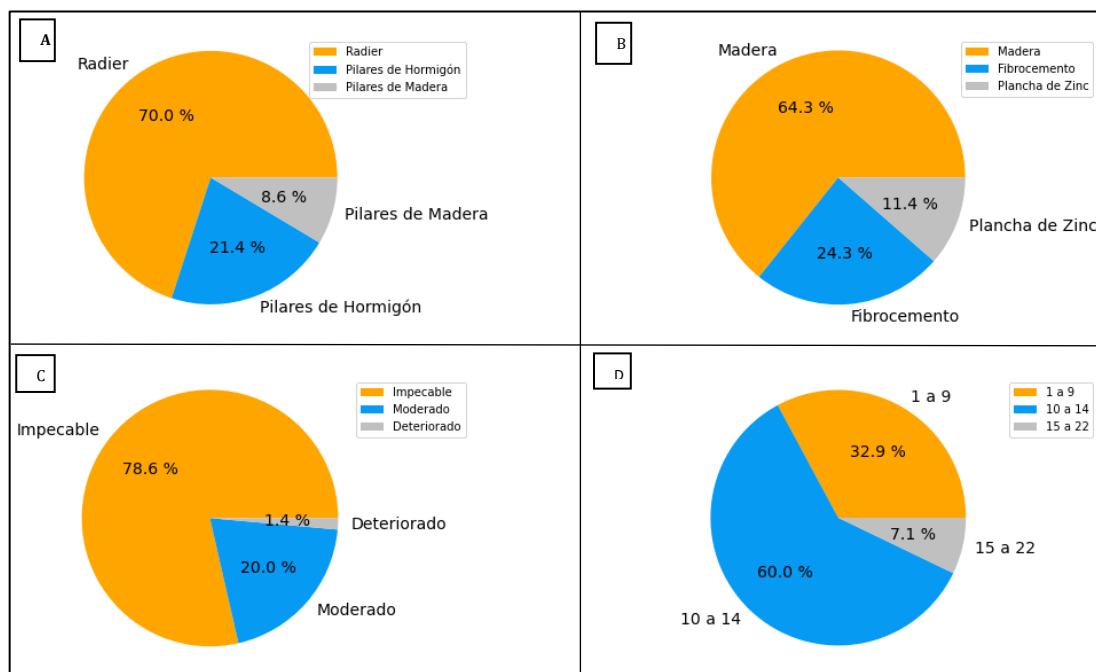
Fuente. Elaboración propia.

Los tipos de cimentación que predominan en las viviendas son el radier (70%), seguido de pilares de hormigón (21.4%) y pilares de madera con 8.6%. Según lo señalado por los expertos, los últimos dos tipos de cimentación son los más susceptibles a presentar algún tipo de daño y, por ende, aumentar la vulnerabilidad de las viviendas (figura 20a).

La materialidad de las viviendas corresponde principalmente a madera (64.3%), luego fibrocemento (24.3%) y, por último, plancha de zinc (11.4%) (figura 20b). La madera como

material de construcción ha permanecido en el diseño arquitectónico de la ciudad desde la llegada de los migrantes chilotes a la zona.

Figura 20. A) Tipo de cimentación, B) Materialidad envolturas, C) Estado de Conservación de la envoltura, D) Número total de aberturas



Fuente. Elaboración propia

Para el indicador número total de Aberturas (figura 20d), el mayor porcentaje de las viviendas presentan entre 10 a 14 aberturas (60%) y un 32.9% varía en el rango de 15 a 22 aberturas. Este indicador es importante para determinar una posible intrusión de agua en las viviendas, especialmente aquellas aberturas orientadas al flujo, en este caso, al norte. Respecto a ello, el máximo aberturas orientadas al norte por viviendas son al menos 9 y el mínimo es 0.

Sólo para la descripción de las viviendas se consideró el Estado de conservación de las envolturas para un mayor detalle (figura 20c). Los resultados indican que dicho factor varía de impecables a deteriorados. Un 78.6% de los edificios habitacionales presentan un estado impecable, el 20% tiene una envoltura moderada, es decir, estructuralmente bien conservada, pero carente de mantención en su revestimiento, pintura, etc. y, por último, 1.4% de las viviendas tiene un estado deteriorado, con grietas y mal estado de sus materiales.

Figura 21. Viviendas afectadas por escenario de crecida extrema



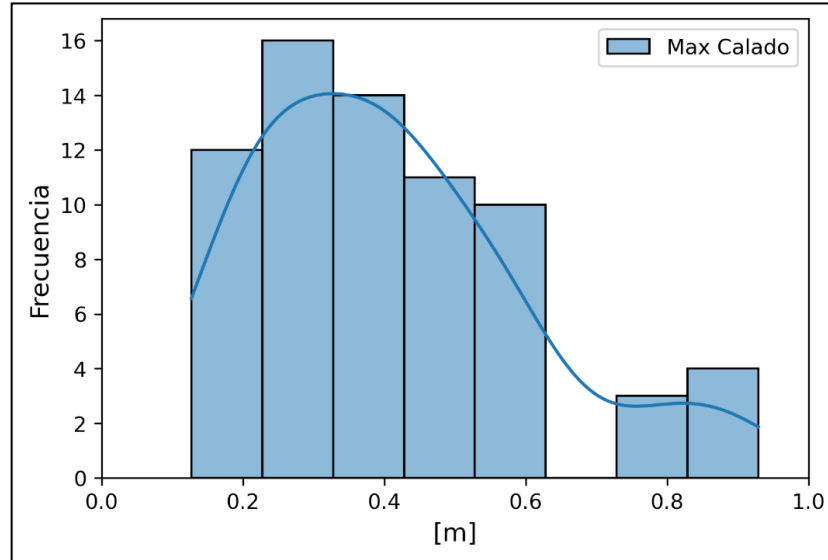
Fuente. Elaboración propia.

6.2.3. MODELO DE PROCESO

Para la elaboración del índice de vulnerabilidad, se consideró que el indicador modelo de proceso está constituido por el impacto y el cambio morfológico. A partir de ello, se obtuvo que, el modelo de proceso presenta valores entre los 0.058 y los 0.749, este último valor se encuentra en la zona 0 de alto peligro.

El impacto calculado está dado por la altura que presenta el flujo en las cercanías de las viviendas afectadas, por lo que a continuación se presenta un histograma (figura 22) con los máximos valores de calado por cada una de las viviendas. En ella, se observa que existe una distribución regular de las frecuencias, entre los 0.1 y los 0.6 m, siendo mayor entre los 0.2 y los 0.4 aproximadamente. Por otro lado, un menor número de viviendas presenta calados altos entre los 0.7 y los 0.9 m.

Figura 22. Histograma de calados máximos por viviendas



Fuente. Elaboración propia

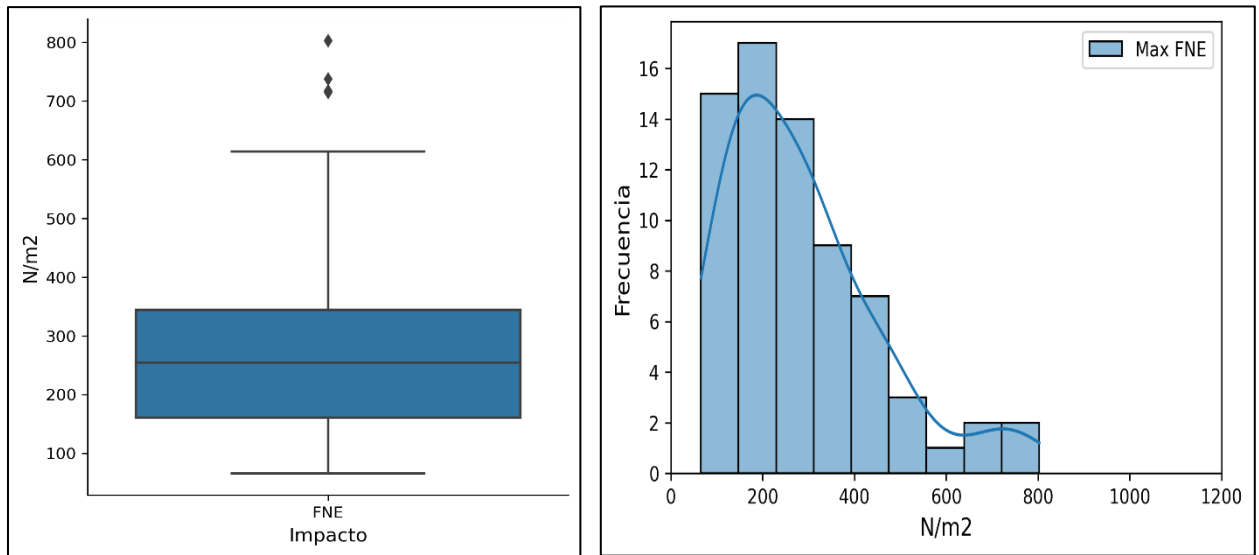
6.2.3.1. IMPACTO

El impacto generado por el flujo en cada una de las fachadas de las viviendas se cuantificó a partir de la fórmula propuesta por Sturm et al. (2018), ya señalada en el apartado de metodología.

a) Fuerza Normal Específica

Se cuantificó la presión ejercida por el flujo en las envolventes de las 70 viviendas expuestas. A fin de interpretar de mejor forma los resultados se consideraron los valores máximos de Fuerza Normal Específica (FNE) por vivienda. A partir de ello, se elaboró un gráfico de caja y bigotes el cual permite visualizar la variabilidad del conjunto de datos. En la figura 23 (izquierda) se puede observar que, los resultados de impacto presentan una muestra positivamente asimétrica, es decir, los valores más altos son más dispersos a comparación de los valores más bajos de la muestra de datos. El valor mínimo de impacto es de 65.7 N/m^2 , el máximo de 802.8 N/m^2 y una mediana de 284.4 N/m^2 . La mayor frecuencia de datos se encuentra entre los 160.9 a los 344 N/m^2 . Otro aspecto por destacar, son los valores atípicos que se alejan de la tendencia general de los datos, los cuales son al menos tres. La figura 23 (derecha) indica que las mayores frecuencias se encuentran entre los 150 y los 300 N/m^2 , a medida que aumenta el impacto, la frecuencia de sus datos es menor, especialmente entre los 550 y los 620 N/m^2 .

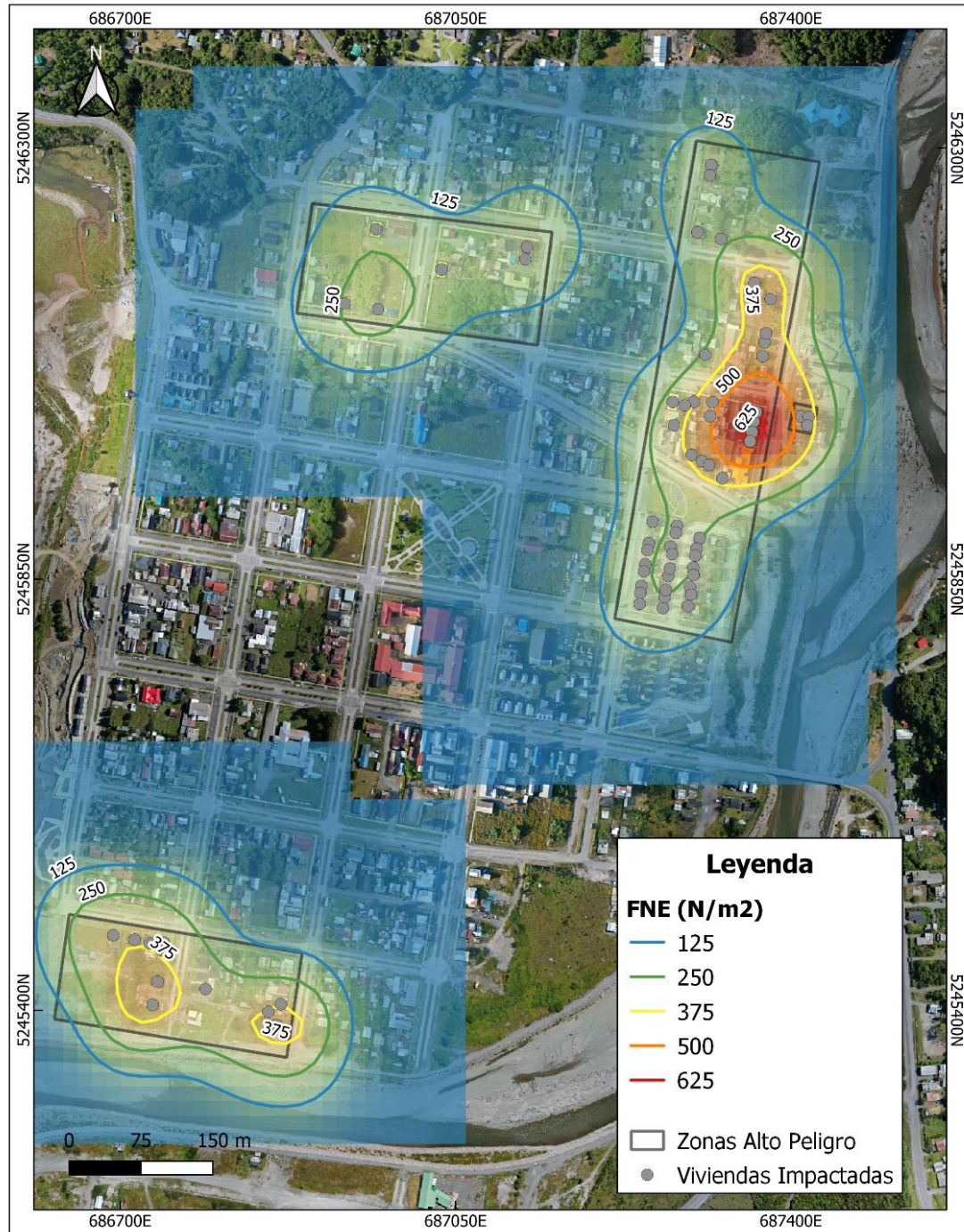
Figura 23. Gráfico de caja y bigotes de FNE (izquierda), Histograma de frecuencia absoluta de FNE (derecha)



Fuente. Elaboración propia.

A continuación, se puede observar un cartografía de isolíneas que muestra la distribución del impacto de Fuerza Normal Específica en el espacio (figura 24). En color rojo se representan aquellas zonas de mayor impacto y en color azul el impacto bajo. Las viviendas mayormente impactadas por el flujo, se ubican en la zona 0 con valores aproximados de 625 N/m², lo cual se produce debido a que es el área donde se desencadena el primer desbordamiento con valores de calado y de velocidad altos. La zona 1 y 3, presentan valores medios aproximadamente de 375 N/m² y para la zona 3 se observan los valores más bajos, entre 250 y 125 N/m².

Figura 24. Cartografía de isolíneas de Fuerza Normal Específica (FNE) (N/m^2).



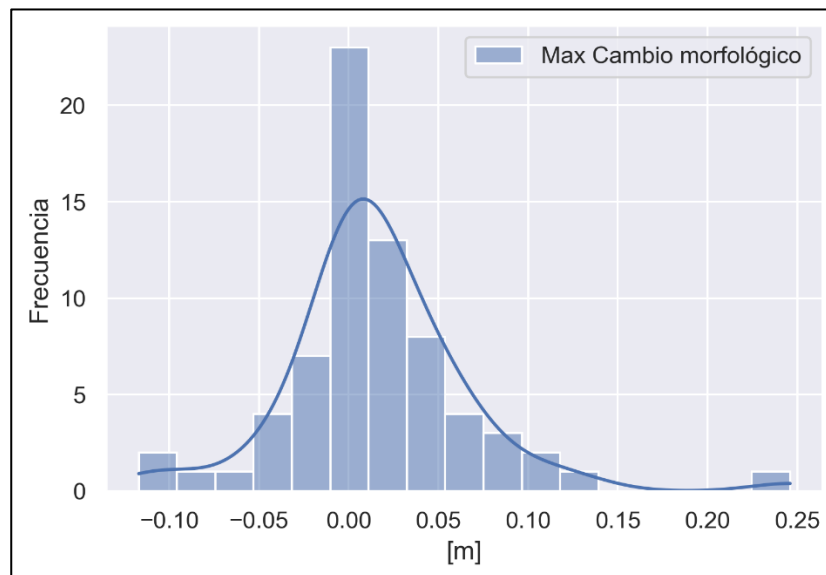
Fuente. Elaboración propia.

6.2.3.2. CAMBIO MORFOLÓGICO

El cambio morfológico es el movimiento producido por el flujo sobre los granos de sedimentos (Chanson, 2004), lo cual se debe a que la fuerza de arrastre ejercida por el suelo es menor que la fuerza del flujo entrante. Los procesos desencadenados por el cambio morfológico son: erosión y sedimentación.

En la figura se observan los valores de cambio morfológico por viviendas en él se muestran valores positivos que indican erosión y negativos de sedimentación. Según lo arrojado por los datos, las viviendas no son afectadas por grandes cambios morfológicos, pues al menos 42 viviendas presentan valores nulos o inferiores a los 0.05 m de sedimentación o erosión. El proceso que más afectó a las viviendas corresponde a erosión, con cerca de 4 viviendas que presentan alturas que varían entre los 0.10 y los 0.24 m. Para el caso de erosión intermedia, 8 viviendas presentaron una erosión de entre 0.05 y 0.08 m. Por otro lado, 2 viviendas fueron afectadas por una sedimentación considerable (0.07 a 0.11 m) y 3 por una sedimentación intermedia (0.05 a 0.08 m).

Figura 25. Gráfico de cambio morfológico por viviendas



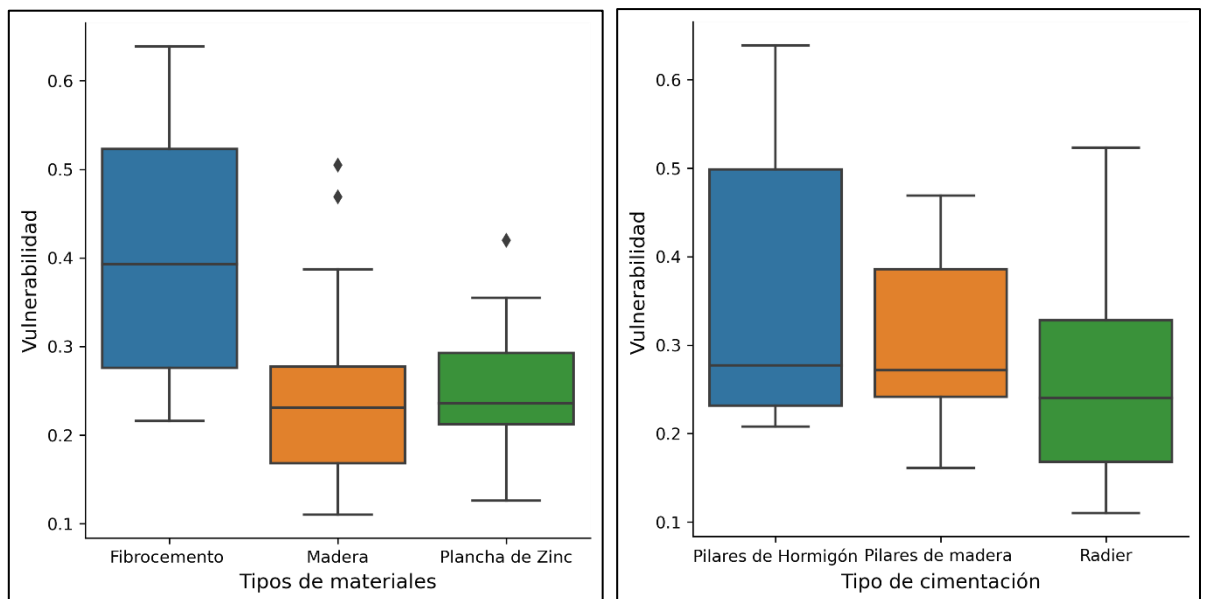
Fuente. Elaboración propia.

6.2.4. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD FÍSICA

Los valores de índice de vulnerabilidad física para las zonas de alto peligro oscilan entre los 0.11 y los 0.639. Como este índice está compuesto por la susceptibilidad de las viviendas y el modelo de proceso, el nivel de vulnerabilidad estará determinada por el valor de ambos indicadores. El índice de vulnerabilidad obtenido permitió identificar cuatro niveles de vulnerabilidad física: baja, media, alta y muy alta. En la figura 27, se aprecia que no existe un patrón distribución homogéneo de los valores de vulnerabilidad en el área estudiada, sin embargo, es posible identificar que las viviendas con niveles de vulnerabilidad muy alta se ubican en las cercanías del río, salvo dos viviendas ubicadas en la zona 2 (noroeste Chaitén Norte).

Las viviendas con vulnerabilidad muy alta se encuentran en un rango que varía entre los 0.336 a 0.639. Los 18 edificios residenciales que presentan este nivel poseen valores de modelo proceso más altos que de susceptibilidad. En los niveles de alta vulnerabilidad (0.262 a 0.336), se observa un comportamiento similar, con excepción de 5 viviendas con valores mayores de susceptibilidad. En cambio, la vulnerabilidad media (0.179 a 0.262) y baja (0.11 a 0.179), son afectadas mayormente por sus características geométricas, estructurales y de materialidad.

Figura 26. Gráficos de tipos de materiales de envoltura (izquierda) y tipos de cimentación de las viviendas en base a valores de vulnerabilidad (derecha)

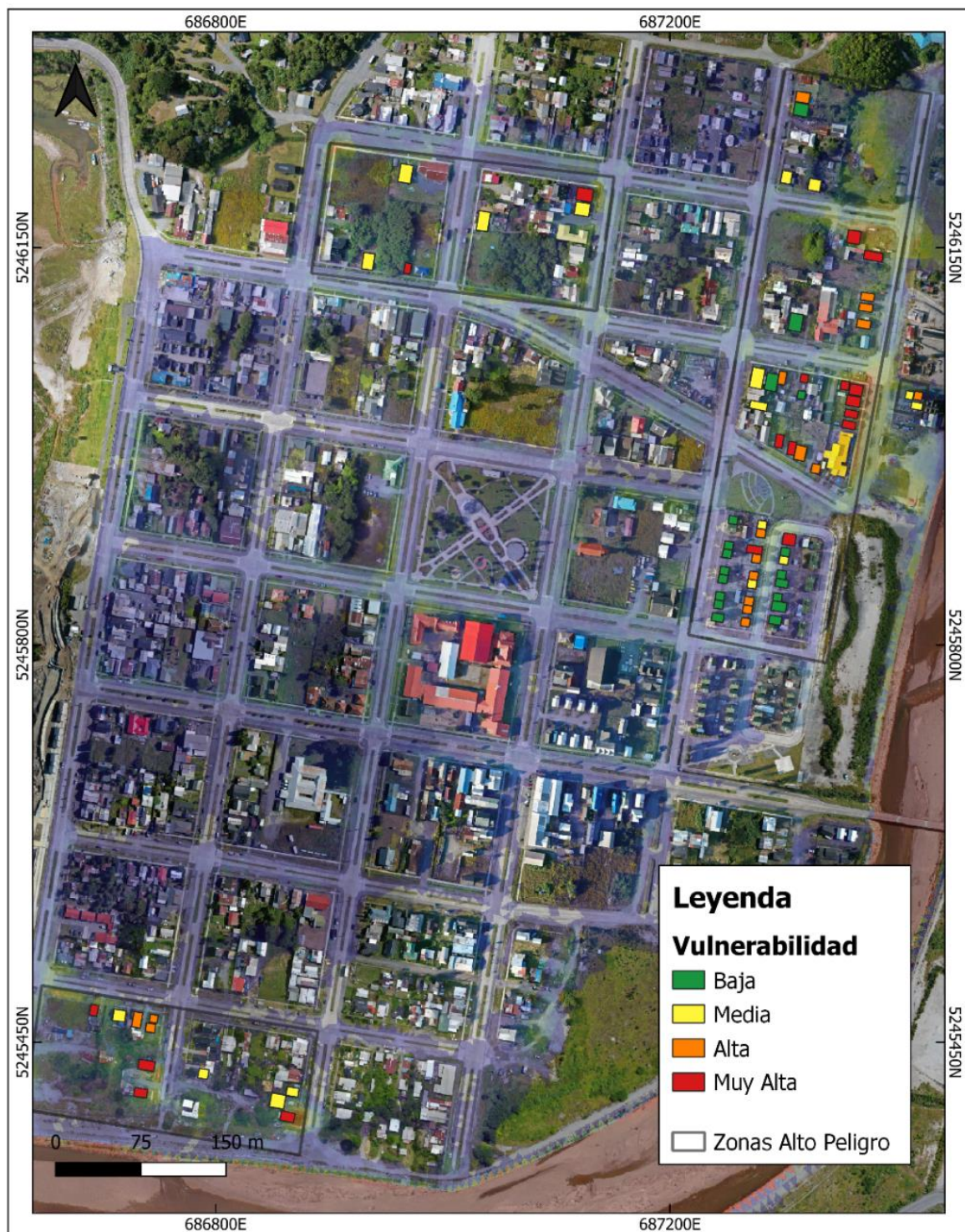


Fuente. Elaboración propia.

La figura 26 (izquierda) muestra que el material de envoltura fibrocemento presenta valores de vulnerabilidad desde los 0.2 a los 0.639, lo cual indica que varía entre los niveles de vulnerabilidad media a muy alta. Este material muestra una gran variabilidad en sus datos, no obstante, la mayor concentración está entre los 0.3 y 0.5 (vulnerabilidad alta y muy alta). Para los materiales madera y plancha de zinc los valores de vulnerabilidad son menores que en el material anterior con valores de altos a bajos. La madera presenta su mayor concentración de datos entre los 0.179 a los 0.262 (vulnerabilidad media) aproximadamente y dos valores atípicos de 0.45 y 0.5. La plancha de zinc muestra una menor variabilidad en su rango intercuartílico y sólo un valor fuera de la tendencia general de datos.

En la figura 26 de la derecha se encuentran los diferentes tipos de cimentación del área de estudios asociados a los valores de vulnerabilidad obtenidos. El tipo de cimentación que presenta los valores más altos de vulnerabilidad son los pilares de hormigón. En este caso, su rango de distribución de datos es amplio, pues varía entre los 0.2 y los 0.639, siendo su mayor concentración 0.230 a los 0.5 (vulnerabilidad media, alta y muy alta) aproximadamente. Los pilares de madera poseen valores de medios a altos, presentando una mayor concentración entre los 0.262 y los 0.360 aprox. (vulnerabilidad Media a Muy Alta). Por último, el radier posee una alta variabilidad en sus datos, con valores que varían entre los 0.11 a 0.5.

Figura 27. Cartografía Índice de Vulnerabilidad física

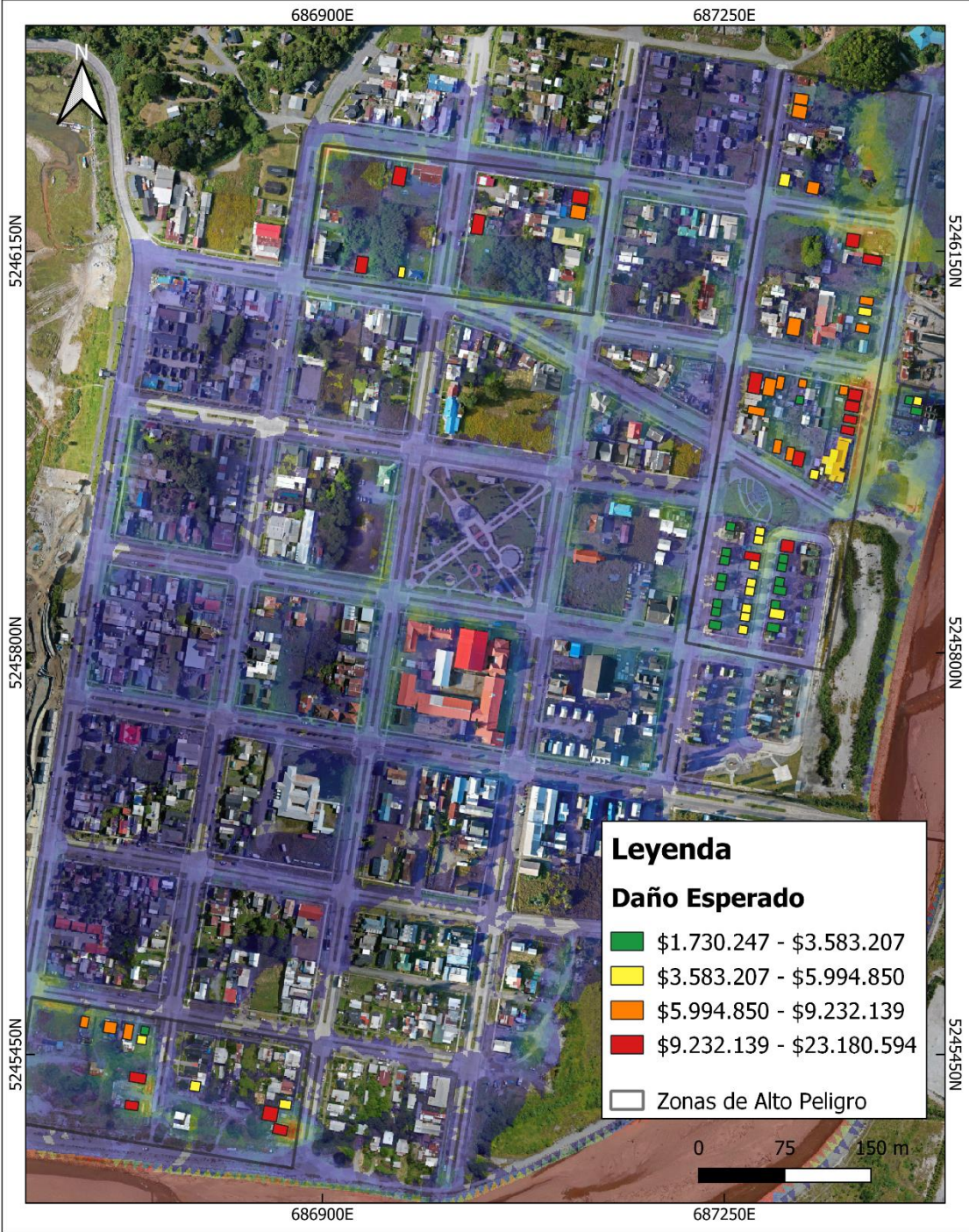


Fuente. Elaboración propia

6.3. DAÑO ESPERADO PARA UN ESCENARIO ESPECÍFICO DE RIESGO POR INUNDACIONES

La cartografía de riesgo específico para un determinado escenario de inundación presenta valores de riesgo asociado al daño económico esperado para cada una de las viviendas. Por tanto, los valores arrojados dependen principalmente de la vulnerabilidad física y del valor de reconstrucción. A partir de lo señalado, la figura (28) muestra en color rojo los valores muy altos, los cuales se encuentran entre los \$9.232.139 - \$23.180.594. Las viviendas que comprenden este rango presentan valores de reconstrucción mayor asociados a sus respectivos materiales de fachadas, tipos de cimentación y mano de obra. En cuanto a los niveles de vulnerabilidad, estos varían entre baja y muy alta. Para el caso de las viviendas con un daño esperado alto (\$5.994.850 - \$9.232.139) y medio (\$3.583.207- \$5.994.850), estas se presentan en color naranja y amarillo, respectivamente. El comportamiento de los valores de reconstrucción y de vulnerabilidad de este nivel se asemejan al anterior, no obstante, los valores de reconstrucción son menores. Para el último nivel, el daño esperado es bajo (\$1.730.247 - \$3.583.207) dado a que tanto sus valores de reconstrucción como sus niveles de vulnerabilidad se encuentran en niveles y/o valores medios y bajos. Al igual que en el índice de vulnerabilidad física, el daño esperado no muestra un patrón homogéneo en el espacio, no obstante, es posible observar que cerca de 12 de las viviendas que presentan un nivel muy alto de daño esperado se encuentran en zonas de alto impacto del flujo.

Figura 28. Cartografía de riesgo específico por inundaciones asociado al daño económico de las viviendas



Fuente. Elaboración propia

7. DISCUSIÓN

Chaitén es una de las comunas de la región de Los lagos, que se vio fuertemente afectada por una gran inundación, que ocasionó grandes pérdidas económicas a nivel de infraestructuras. El desastre ocurrido en esta ciudad llamó la atención de diversos investigadores, que buscaban comprender la dinámica eruptiva, procesos hidrológicos y las consecuencias generadas en el sistema de carga. Si bien, ninguna de las investigaciones evalúa o analiza el riesgo por inundaciones de forma completa, un acercamiento a ello es la investigación realizada por Basso-Báez et al. (2020). En ella, se utilizó el método hidrológico para obtener el caudal para una inundación con un tiempo de retorno de 30 y 100 años, se simuló posteriormente la extensión de la inundación incluyendo los efectos de una posible obstrucción del puente “Carretera Austral”. También, se cuantificaron indicadores de rendimiento (Fuerza Normal Específica y Fuerza de Flotabilidad) para 13 edificios residenciales.

a) Extensión de la inundación

Debido a la escasa información hidrológica del río Blanco, se simuló un escenario de inundación de gran magnitud, en contexto de afectación por volcanismo y con un tiempo de retorno aproximado entre 200-300 años. Los resultados obtenidos de esta simulación arrojaron que el área afectada por la inundación corresponde principalmente al sector norte de la zona urbana de la ciudad, lugar donde inicia el desbordamiento y se extiende hasta llegar al delta. A partir de ello, se identificaron 4 zonas residenciales de alto peligro, ubicadas principalmente en las cercanías del río Blanco (zona 0, zona 1 y zona 3), salvo la zona 2 localizada al noroeste de la ciudad. Las alturas del flujo no alcanzan 1m en la zona urbana, sin embargo, se consideraron suficientemente altas como para generar diversos mecanismos de daños en las viviendas expuestas. El comportamiento que presenta el flujo modelado se asemeja al escenario de T100 años con 50% de obstrucción del puente, simulado en Basso-Báez et al. (2020), en donde el sector norte de la ciudad es mayormente inundado. En ambos casos, se puede identificar que un punto de desbordamiento es la parte del enrocado cerca de la cárcel ubicada al noreste de Chaitén.

En el escenario de crecida extrema se observó que las defensas fluviales son sobrepasadas o ceden ante el impacto del flujo en 3 secciones. El comportamiento de estas estructuras se asocia a que los enrocados están contruidos para soportar crecidas con un tiempo de retorno de hasta 100 años (Dirección de Obras Hidráulicas, 2014), por tanto, al modelar un escenario con tiempo de retorno aproximado de entre 200-300 años este claramente podría presentar algún tipo de daño o simplemente ser sobrepasado.

b) Impacto del flujo en las viviendas

Los resultados arrojados del impacto de Fuerza Normal Especifica, muestran una clara correlación entre las alturas del flujo en las aproximaciones de las viviendas y las fuerzas de impacto (Sturm et al., 2018). Los valores máximos de impacto se encontraron en las viviendas ubicadas en las cercanías del río, con valores superiores a 500 N/m² aproximadamente. La ecuación propuesta por Sturm et al. (2018) no considera la variabilidad dinámica del flujo, lo cual no permite un estudio completo de los proxies de impacto.

Una de las incertidumbres que presenta la evaluación del impacto, es la simplificación de las geometrías de las viviendas a polígonos de cuatro caras, hecho que pudiera no reflejar adecuadamente el comportamiento del flujo de la inundación (Basso-Báez et al., 2020). Otro aspecto por destacar es que, los edificios circundantes a la vivienda impactada modifican los patrones del flujo, por ende, pueden reducir o aumentar las fuerzas de impacto (Sturm et al., 2018).

c) Índice de vulnerabilidad física de las viviendas

Para cuantificar el índice de vulnerabilidad de las viviendas se utilizó como base la metodología propuesta por Papathoma-Köhle et al. (2019), la cual utiliza un enfoque basado en indicadores aplicado para cuatro estudios diferentes en los Alpes europeos, en edificios sujetos a inundaciones dinámicas. En la presente investigación no fueron utilizados todos los indicadores propuestos por los autores, debido a las diferencias arquitectónicas entre las ciudades y también, a la dificultad para levantar información de las viviendas durante el trabajo de campo. Sin embargo, se consideró la idea central de la propuesta metodológica del estudio.

La evaluación de los indicadores de la vulnerabilidad física de las viviendas se llevó a cabo a través del método Analítico Jerárquico (AHP), el cual tiene como objetivo principal cuantificar la prioridad que presenta un conjunto de criterios en función de una escala de valores adecuada (Atanasova-Pachemska, 2014). Las ventajas que presenta este método son: permite descomponer y analizar un problema complejo por partes; incorpora la participación de diversos expertos en el juicio (Toskano, 2005); la discusión de los criterios se realiza en función del conocimiento y las experiencias de cada uno de los expertos; se detectan las incoherencias durante el proceso de decisión, lo que permite corregirlas en caso de ser necesario (Kayastha et al., 2013). En cuanto a sus desventajas, la clasificación u ponderación de los distintos criterios pueden diferir entre expertos (Kayastha et al., 2013) y el diseño erróneo del problema o la no consideración de criterios importantes para la investigación pueden generar distorsiones en los pesos de los criterios y, como consecuencia

errores en los resultados finales (Zanazzi, 2003). Para el caso de estudio, los resultados arrojados durante las ponderaciones indican que el criterio que influye más en la vulnerabilidad de los elementos expuestos corresponde al modelo de proceso, por tanto, los valores del índice de vulnerabilidad estarán determinados principalmente por este último.

El índice de vulnerabilidad física de las viviendas expuestas muestra que aquellos edificios que presentan un mayor grado de pérdida se ubican en aquellas zonas con valores altos de Fuerza Normal Específica y a una baja distancia del borde del río, aproximadamente a menos de 150 m de este, con excepción de dos viviendas localizadas a distancias de 364 y 511 m. En cuanto a las propiedades físicas, es posible mencionar que las viviendas que presentan una vulnerabilidad muy alta y alta están construidas principalmente por fibrocemento y pilares de hormigón. Respecto al tipo de cimentación, se pudo observar que el radier a pesar de ser considerado por los expertos como una característica estructural menos influyente durante la ponderación de los criterios presenta valores de vulnerabilidad altos, lo cual se puede asociar a que sus valores de impactos son mayores.

Si bien durante el transcurso de esta investigación no se analizó la respuesta estructural de las viviendas ante el impacto del flujo, se mencionarán teóricamente los distintos mecanismos de daños, a los cuales están sujetos los edificios residenciales impactados. Según lo expuesto por Suda et al. (2012) los efectos o mecanismos de daños que podría generar una inundación hidrodinámica son: **socavación** de los cimientos, debido a la formación de vórtices en las bases que provoca erosión del suelo, **desplazamiento** producto de la disminución de la fuerza de fricción entre el suelo y la vivienda, **volcamiento de la vivienda**, **flotabilidad** desencadenada por la presión ejercida por el agua del fondo en los cimientos de los edificios residenciales y **colisión** de troncos u objetos de gran tamaño en las envolturas. Los mecanismos anteriormente mencionados corresponden a la pérdida de la estabilidad externa de la vivienda. En cuanto a la pérdida de la estabilidad interna, se puede mencionar las fallas estructurales de las paredes debido a las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas ejercidas por el flujo. El último mecanismo de daño corresponde a la intrusión de agua o material por las aberturas de las viviendas, el cual puede provocar daños por anegamientos, contaminación y también, el deterioro de inmuebles (Suda et al., 2012).

d) Daño esperado para un escenario específico de riesgo por inundaciones

En cuanto al daño esperado asociado al escenario específico de riesgo se observó que los valores monetarios no se encuentran distribuidos homogéneamente en el espacio del área estudiada, sin embargo, es posible identificar que los valores más altos (\$12.543.520 – \$23.180.594) se ubican principalmente en la zona 0, 2 y 3. También, se puede mencionar que dichas viviendas se encuentran en zonas altamente vulnerables, lo cual se transforma en un riesgo para aquellas personas que habitan estos sectores.

e) Recomendaciones de medidas de mitigación

A partir de los resultados obtenidos, se pueden sugerir recomendaciones de medidas mitigación del riesgo ligadas tanto al sistema de respuesta como a la reducción de la vulnerabilidad de las viviendas expuestas. En cuanto a la primera, se pueden mencionar las sugerencias propuestas por los investigadores de Basso-Báez et al. (2020), las cuales son la estabilización de las riberas para disminuir los desplazamientos laterales y las erosiones y también, la intervención del canal principal para dificultar y/o impedir los atascos de troncos río abajo. Para el caso de medidas para reducir las vulnerabilidades de los edificios, se pueden indicar las protecciones de estructura local señaladas por Holub et al. (2012). Aunque esta investigación se enfocó en los peligros de zonas de montaña, se rescataron algunas de sus medidas. Existen dos tipos de protecciones de estructura local, la primera de ellas corresponde a estructuras conectadas directamente al edificio y las segundas, a estructuras de cerramiento que rodean estos. En cuanto a los refuerzos estructurales se pueden implementar reforzamientos en las cimentaciones y paredes orientadas al flujo (e.g. Cubiertas adicionales), evitar o disminuir las dimensiones de las aberturas en dirección al flujo y, por último, reforzar las aberturas. La medida constructiva anexa al edificio que se podría complementar a lo anteriormente mencionado es la construcción de muros de deflexión.

Otra medida de mitigación y/o prevención del peligro de las inundaciones es el conocimiento de posibles zonas de alto impacto, a través de la elaboración de cartografías de impacto máximo de flujo (figura 29). Estas visualizan la máxima fuerza que recibiría la base de una fachada orientada ortogonal a la dirección de máxima velocidad. La cartografía es el resultado de la suma de las cargas hidrostáticas e hidrodinámicas del flujo, calculándose a través de la siguiente expresión, siendo: ρ : ro; g : gravedad; a : ancho pared; h : altura del flujo; V : velocidad

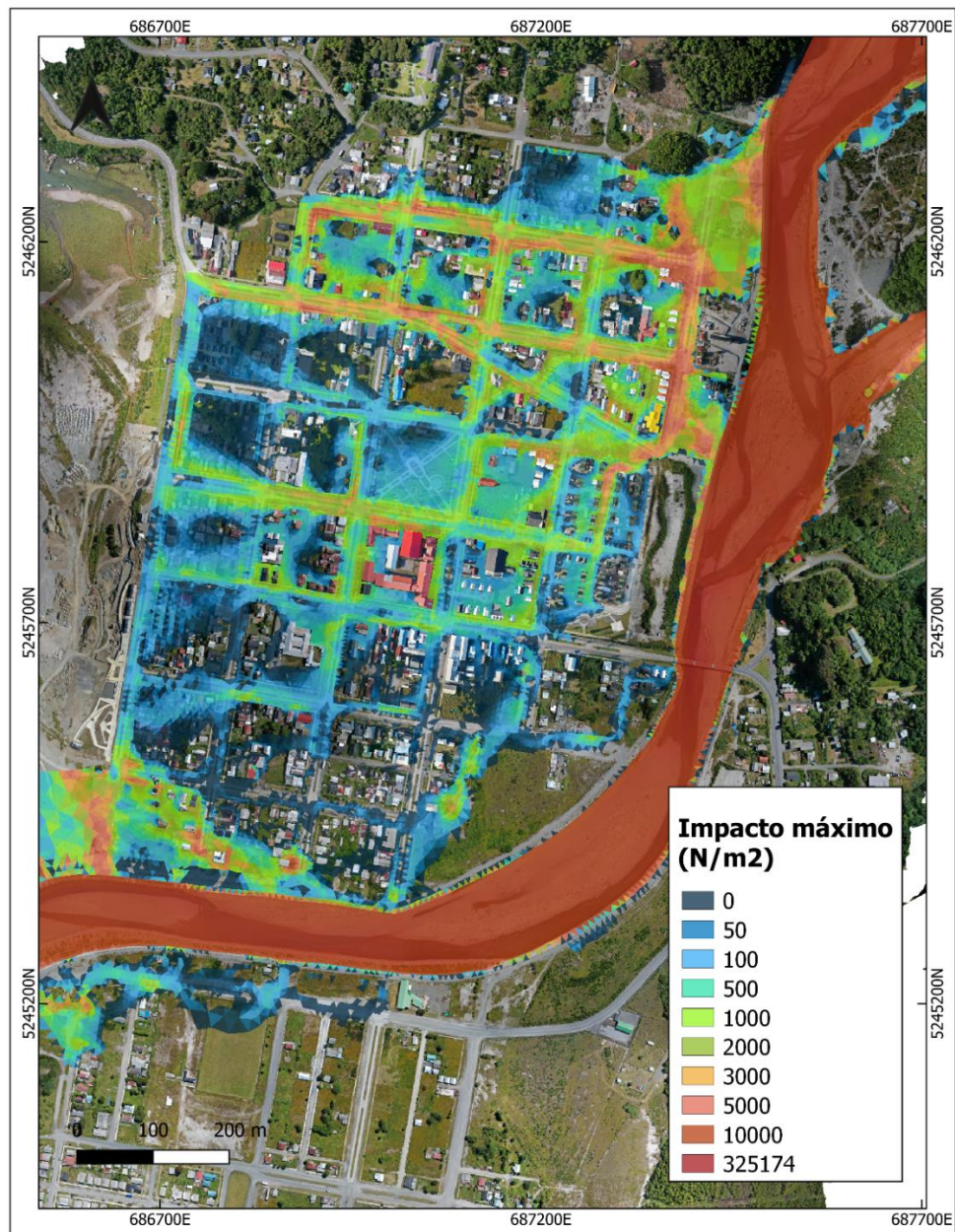
$$F = \frac{\rho}{2} g a h_1^2 + \rho h_1 a V_1^2$$

En la figura 25, se observan los distintos impactos que presentaría el entorno construido de la ciudad de Chaitén. Aquellas zonas que presentan colores anaranjados representarían las zonas de altos impactos y los colores azulinos, zonas de menor impacto. Los resultados podrían indicar a la población las áreas de mayor peligro para la construcción de viviendas y también, señalar qué viviendas localizadas en estas zonas son altamente vulnerables al peligro por inundaciones.

Existen diversas medidas técnicas de mitigación y prevención de riesgos que ayudan a disminuir los impactos de las amenazas, no obstante, un punto clave en la reducción de desastres es la planificación del uso de territorio. La gestión del riesgo mediante los instrumentos de planificación territorial es esencial para reducir de manera sostenible las

pérdidas generadas por el peligro por inundaciones (Mazzorana et al., 2019). Una acción que se puede realizar a través de estos instrumentos es limitar la exposición de los asentamientos e infraestructuras en llanuras aluviales de los sistemas fluviales (Basso-Báez et al., 2020).

Figura 29. Cartografía de impacto máximo del flujo



Fuente. Elaboración propia.

f) Limitaciones e incertidumbres de la investigación

Las limitaciones e incertidumbres presentadas durante este trabajo de investigación se asocian a los siguientes procesos metodológicos:

- **Simulación hidrodinámica:** la escasez de información hidrológica de la cuenca del río Blanco aumenta la incertidumbre de la simulación hidrodinámica. Esto genera errores en el desarrollo e interpretación de los resultados. Así también, cómo se menciona en Basso-Báez et al. (2020) las limitaciones intrínsecas en el enfoque de modelización pueden afectar la estimación de los proxies de impacto. Otro aspecto por destacar es que, durante las simulaciones las alcantarillas y canaletas no se consideraron como condiciones iniciales, lo cual puede modificar el comportamiento del flujo en el entorno construido de la ciudad.
- **Método Analítico Jerárquico:** la evaluación del indicador de vulnerabilidad de las viviendas se enfocó en una metodología basada en indicadores, evaluada a través del método experto Analítico Jerárquico. La selección y ponderación de indicadores a través de métodos basados expertos aumenta la subjetividad de los resultados y, por ende, la incertidumbre. Además, según lo mencionado por la OCDE la ponderación y agregación de los indicadores a índices de vulnerabilidad pueden tener un gran impacto en las clasificaciones finales y, por ende, en la toma de decisiones (Papathoma-Köhle et al., 2019).

g) Particularidades y aplicación de la investigación

Finalmente, se obtuvo una cartografía de riesgo específico para zonas de alto peligro, a partir de un escenario de crecida extrema, con un caudal de 750 m³/s y bajo un contexto de afectación por volcanismo. Este producto fue el resultado de una serie de procesos metodológicos que permitieron cuantificar el impacto, evaluar la vulnerabilidad de las viviendas y el daño esperado de los elementos expuestos. Si bien, esta investigación no se aplicó para todo el entorno construido de Chaitén se podría considerar como un punto de partida para la evaluación del riesgo por inundaciones en la ciudad, debido a que permite identificar y priorizar aquellas zonas que deben ser estudiadas en profundidad en futuras investigaciones. De igual forma, ayuda a orientar a los tomadores de decisiones en torno a la mitigación del riesgo, entendiendo cuales son los factores de impacto a mitigar y que elementos estructurales habría que mejorar.

El presente trabajo de investigación entrega un insumo metodológico para la evaluación del riesgo por inundaciones, el cual podría ser aplicado en aquellas zonas afectadas por perturbaciones volcánicas y en contextos urbanos que presenten tipologías arquitectónicas similares a Chaitén. Parte de las recomendaciones que se podrían mencionar para obtener resultados más óptimos son la automatización de ciertos procesos como, por ejemplo, la delimitación de las viviendas y la extracción de los valores máximos de las variables hidráulicas estudiadas, cuantificar la presión hidrodinámica del flujo en las envolturas de las viviendas y también, considerar en la evaluación de la vulnerabilidad física indicadores como el estado de conservación de las fachadas y la presencia de edificios circundantes.

8. CONCLUSIONES

Chaitén fue severamente afectado por la erupción volcánica del año 2008, la cual trajo una serie de modificaciones en el lecho del río Blanco. Estas modificaciones hasta el día de hoy generan un considerable riesgo para la población que habita dicha zona. Es por ello, que la presente investigación consistió en analizar el riesgo por inundaciones en la ciudad de Chaitén. Se concluyó que para un escenario específico de crecida extrema de $750 \text{ m}^3/\text{s}$ gran parte de Chaitén Norte es alcanzado por el flujo. El análisis realizado en las 4 zonas escogidas arrojó que 70 viviendas localizadas en las áreas aledañas al cauce del río Blanco se encuentran en alto peligro de inundaciones. Esto se produce debido a que el enrocado es sobrepasado en tres secciones, lo cual genera un impacto directo del flujo en las viviendas ubicadas en estas zonas. El índice de vulnerabilidad física indica que los edificios residenciales ubicados a distancias menores del río son altamente vulnerables, lo cual coincide con los valores altos de Fuerza Normal Específica. Las viviendas con vulnerabilidad muy alta están principalmente construidas por fibrocemento y pilares de hormigón, materiales considerados como influyentes durante la ponderación de los indicadores de vulnerabilidad. El daño esperado a partir del escenario de riesgo específico arrojó que al menos 12 viviendas ubicadas en las zonas de alto peligro presentan valores muy altos, lo cual refleja un alto riesgo para las personas que habitan estas áreas.

Para llevar a cabo este estudio, se consideraron métodos específicos como las modelaciones hidrodinámicas para observar la extensión de la inundación de un escenario, fichas descriptivas para recopilar la información de las viviendas y el método AHP para evaluar los pesos de los indicadores utilizados en el índice de la vulnerabilidad física. El método Analítico Jerárquico permitió evaluar de forma rápida y sencilla los criterios a través de la opinión de expertos, lo cual permite que este sea utilizado para solucionar problemas complejos.

El desarrollo de esta investigación en el entorno construido y específicamente, en las zonas de alto peligro, se podría considerar como un punto de partida para la evaluación del riesgo por inundaciones en la ciudad. Debido a que no se implementó un análisis de riesgo para todo Chaitén se sugiere realizar un análisis exhaustivo del riesgo que contemple toda la zona urbana de la ciudad. De igual forma, se incentiva la divulgación de estos estudios tanto a la comunidad como a los tomadores de decisiones, para conocimiento del peligro de la zona habitada y también, para en conjunto elaborar medidas de prevención y mitigación del riesgo de inundaciones.

9. REFERENCIAS

- Agrupación Cultural Chaitén. (2018). *Chaitén: Inventario de inmuebles patrimoniales*. Santiago de Chile: Fundación ProCultura.
- Aldridge, B. N., & Garrett, J. M. (1973). *Roughness coefficients for stream channels in Arizona* (No. 73-3). US Geological Survey.
- Arévalo, M. (2017). *Análisis de la vulnerabilidad físico estructural y funcional en edificaciones públicas y privadas ante el riesgo de inundaciones generadas por el desborde de la quebrada serrano en el sector urbano de la ciudad de Saposo* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.
- Atanasova-Pachemska, T., Lapevski, M, y Timovski, R. (2014). Analytical hierarchical process (ahp) method application in the process of selection and evaluation. *International Scientific Conference*.
- Basso-Báez, S., Mazzorana, B., Ulloa, H., Bahamondes, D., Ruiz-Villanueva, V., Sanhueza, D., Iroumé, A. y 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*, 102, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102655>
- 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.
- Blanco-Vogt, A. y Schanze, J. (2014). Assessment of the physical flood susceptibility of buildings on a large scale – conceptual and methodological frameworks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2105–2117.
- Benson, M. A., & Dalrymple, T. (1967). *General field and office procedures for indirect discharge measurements* (No. 03-A1). US Govt. Print. Off.
- Cardona, O. (2001). *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

- Centro de Información de Recursos Naturales. (2017), *Región de Los Lagos, Provincia de Palena, Comuna de Chaitén, Recursos naturales y proyectos*. Recuperado de https://www.sitrural.cl/wp-content/uploads/2020/03/Chaiten_rec_nat_proy.pdf
- Cifuentes, D. (2011). *Modelación de vulnerabilidad física de estructuras de uno y dos pisos, asociada a deslizamientos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Chanson, H. (2004). Introduction to sediment transport in open channels. *Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures (2nd Edition) (143-245)*. Oxford, Great Britain: Elsevier
- Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics. *McGraw-Hill civil engineering series*.
- Decreto 1512 de 2016. Aprueba Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado de <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1100397&idVersion=2017-02-18>.
- Delgado, G., Huneeus, T., Jeldes, C., y Villarroel, G. (2005). *Chaitén. Su historia desde la memoria*. Santiago de Chile: Caminante Libros.
- Díaz, A. (2013). *Vivienda en Chaitén: Regeneración Urbana a través de la vivienda post-erupción del volcán Chaitén* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- Dirección de obras hidráulicas. (2014). Informe final: "Estudio de mitigación de riesgo de inundación río Blanco en Chaitén, comuna de Chaitén, provincia de Palena, Región de Los Lagos". Ministerio de Obras Públicas.
- Doswell III, C. (2003). Flooding. *Elsevier Science*, 769-776. Recuperado de https://curry.eas.gatech.edu/Courses/6140/ency/Chapter8/Ency_Atmos/Flooding.pdf
- Ferrando, F. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*. Obtenido de http://web.uchile.cl/vignette/revistaurbanismo/CDA/urb_complex/0.1311.SCID%253D19141%2526ISID%253D668%2526IDG%253D2%2526ACT%253D0%2526PRT%253D19132,00.html
- Fuchs, S. (2009). Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria - paradigms of vulnerability revisited. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 9, 337-352.
- Fuchs, S., M. Keiler, R. Ortlepp, R. Schinke, and M. Papathoma-Köhle. (2019). Recent Advances in Vulnerability Assessment for the Built Environment Exposed to

- Torrential Hazards: Challenges and the Way Forward. *Journal of Hydrology*, 575, 587–95. doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.067.
- González, J. (Ed.). (2009). *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*. Madrid, España: Fuego Editores, S.L.
- González, M. (2011). *Estudio del Impacto Territorial-Ambiental Generado por la Erupción del Volcán Chaitén* (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago.
- Guo, Y., Wu, Y., Wen, B., Huang, W., Ju, K., Gao, Y, y Li, S. (2020). Flood in China, COVID-19, and climate change. *The Lancet Planetary Health*. [http://dx.doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30203-5](http://dx.doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30203-5)
- Holub, M., Suda, J. y Fuchs, S. (2012). Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design. *Environmental Earth Sciences*, 66, 1853-1870.
- Ibrahim, A., Tiki, D., Mamdem, L., Leumbre, O., Bitom, D, y Lazar, G. (2018). MultiCriteria Analysis (MCA) Approach and GIS for Flood Risk Assessment and Mapping in Mayo Kani Division, Far North Region of Cameroon. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 7, 2793-2808.
- Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España, 2008. España. Ministerio de Vivienda, Gobierno de España. Recuperado de http://www.icog.es/files/GUIA_CARTOGRAFIAS_RIESGOS_NATURALES.pdf
- James, M. R., y Robson, S. (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>
- Kayastha, P., Dhital, M., y, De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.
- Klaus D. Goepel, (2013). Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs, *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Kuala Lumpur 2013*. DOI: <https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>.

- Kumpulainen, S. (2006). Vulnerability concepts in hazard and risk assessments. En Schmidt-Thomé, P. (Ed.), *Natural and technological hazards and risks affecting the spatial development of European regions* (pp. 65-74). Editoria: Geological Survey of Finland.
- Lytle, D. y Poff, N. (2004). Adaptation to natural Flow regimes. *Trends in ecology and evolution*, 19, 94-100.
- Li, X. quan, Chen, Z. an, Zhang, L. ting, & Jia, D. (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>
- Llorente, M., Díez-Herrero, A. y Laín, L. (2009). Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: avances recientes. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 29-37.
- McMillan, H. K., Westerberg, I. K., & Krueger, T. (2018). Hydrological data uncertainty and its implications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 5(6), e1319.
- Major, J., Bertin, D., Pierson, T., Amigo, A., Iroumé, A., Ulloa, H., y Castro, J. (2016). Extraordinary sediment delivery and rapid geomorphic response following the 2008-2009 eruption of Chaitén Volcano. *Water Resources Research*, 52, 5075-5094, doi:10.1002/2015WR018250.
- Major, J., y Lara, L. (2013). Overview of Chaitén Volcano, Chile, and its 2008-2009 eruption. *Andean Geology*, 40 (2), 196-215.
- Maldonado, L., Kronmuller, E., y Gutiérrez, I. (2016). Estrategia para la inferencia causal y planificación de estudios observacionales en las ciencias sociales: el caso de Chaitén post erupción del 2008. *Revista de Ciencia Política*, 36(3), 797-827.
- Mazzorana, B. y Fuchs, S. (2010). Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. *Environmental Modelling & Software*, 25 (10), 1208 - 1224. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.030>
- Mazzorana, B., Levaggi, L., Keiler, M. y Fuchs, S. (2012). Towards dynamics in flood risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 3571-3587.
- Mazzorana, B., Simoni, S., Scherer, B., Gems, B, Fuchs, S y Keiler, M. (2014). A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 18, 3817-3836.

- Mazzorana, B., Picco, L., Rainato, R., Iroumé, A., Ruiz-Villanueva, V., Rojas, C., Valdevenito, G., Iribarren-Anacona, P. y 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.
- Merz, B., Thielen, A. y Gocht, M. (2007). Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges. En Begum, S., Stive, M. y Hall, J. (Eds.), *Flood Risk Management in Europe: Innovation in Policy and Practice* (231-251). Dordrecht, Netherlands: Springer
- Moss, M. E. (1979). Some basic considerations in the design of hydrologic data networks. *Water Resources Research*, 15(6), 1673-1676.
- Olcina, J. (2004). Riesgo de Inundaciones y ordenación del territorio en la escala local: el papel del planeamiento urbano municipal. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 37, 49-84. Recuperado de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/23011/1/2004_Jorge_Olcina_Boletin_AGE.pdf
- Olcina, J. (2012). De los mapas de zonas afectadas a las cartografías de riesgo de inundación en España. *Anales de Geografía*, 32 (1), 91-131. Doi: http://dx.doi.org/10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39310
- Padrón, C. (2017). Metodología para evaluar la vulnerabilidad física de viviendas en barrios urbanos autoproducidos. *Terra Nueva Etapa*, XXXIII (53), 197-218.
- Pallister, J., Diefenbach, A., Burton, W., Muñoz, J., Griswold, J., Lara, L., Lowenstern, J., Valenzuela, C. (2013). The Chaitén rhyolite lava dome: Eruption sequence, lava dome volumes, rapid effusion rates and source of the rhyolite magma. *Andean Geology* 40, (2), 277-294. [doi:<http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a06>]
- Papathoma-Köhle, M., Gerns, B., Sturm, M., y Fuchs, S. (2017). Matrices, curves and indicators: A review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews*, 171, 272-288.
- Papathoma-Köhle, M., Schlögl, M. y Fuchs, S. (2019). Vulnerability indicators for natural hazards: an innovative selection and weighting approach. *Scientific Reports*
- Renda, E., Rozas, M., Moscardini, O. y Torchia, N. (2017). Manual para la elaboración de mapas de riesgo. Buenos Aires: Ministerio de seguridad de la Nación.

- Rojas, O. y Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 20, 83-116.
- Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., y Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile período 1574 -2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177-192.
- Rojas, O., Mardones, M., Rojas, C., Martínez, C y Flores, L. (2016). Desastres por inundaciones fluviales en un área de expansión urbana: curso inferior de la cuenca del río Andalién-Chile central (1943-2011). Tercer Congreso de la Sociedad de Análisis del Riesgo en Latinoamérica, Sao Paulo, Brasil.
- Rute, C. (2014). *Diseño y estudio de defensas fluviales en la ibera sur del río Blanco en Chaitén* (Tesis de Pregrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Sandoval, V., Boano, C., González-Muzzio, C. y, Albornoz, C. (2015). Explorando potenciales vínculos entre Resiliencia y Justicia Ambiental: El Caso de Chaitén, Chile. *Magallania*, 43 (3), 37-39.
- Saaty, R. (1987). The Analytic Hierarchy Process-What it is and how it is used. *Mathl Modelling*, 9, (3-5), 161-176.
- Segoni, S., Tofani, V., Rosi, A., Catani, F., & Casagli, N. (2018). Combination of Rainfall Thresholds and Susceptibility Maps for Dynamic Landslide Hazard Assessment at Regional Scale. *Frontiers in Earth Science*, 6, 85. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00085>
- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2017). *Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile*. Recuperado de <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf>
- Schneiderbauer, S. y Ehrlich, D. (2004). Risk, hazard and people's vulnerability to natural Hazard: a Review of Definitions, Concepts and Data. *European Commission Joint Research Centre*. https://www.researchgate.net/publication/268149143_Risk_Hazard_and_People's_Vulnerability_to_Natural_Hazards_a_Review_of_Definitions_Concepts_and_Data/link/55e6916308aebdc0f58bb763/download
- Spachinger, K., Dorner, W., Fuchs, S., Serrhini, K, y Metzka, R. (2008). Flood risk and flood hazard maps - visualization of hydrological risks. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*.

- Sturm, M., Gems, B., Keller, F., Mazzorana, B., Fuchs, S., Papathoma – Köhle, M. y Aufleger, M. (2018). Experimental analyses of impact forces on buildings exposed to fluvial hazards. *Journal of Hidrology*, 565, 1-13.
- Suda, J., Holub, M., Hübl, J., Jaritz, W., Starl, H, y Rudolf-Miklau. (2012). Gefährdungs- und Schadensbilder für Gebäude. En Suda, J, y Rudolf-Miklau (Eds). *Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz* (71-117). Wien: Springer
- Toskano, G. (2005). *El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Ulloa, H., Iroumé, A., Picco, L., Korup, O., Aristide, M., Mao, L, Ravazzolo. (2015). Massive biomass flushing despite modest channel response in the Rayas River following the 2008 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Geomorphology*, 250, 397-406.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction. (2009). *UNISDR Terminology on Disaster, Risk, Reduction*. Geneva: Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf
- Vergara, M., Ellis, E., Cruz, J., Alarcón, L. y Galván, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y Cultura*, 36, 45-69. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/267/26721226003.pdf>
- Zanazzi, J. (2003). Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty. *Problemas del conocimiento en ingeniería y geología*, 1, 148- 170.

10.ANEXOS

Anexo 1. Tabla Inventario susceptibilidad viviendas

Código vivienda	Superficie	Valor normalizado	Volumen	Valor normalizado	Nº total aberturas	Valor normalizado	Tipo cimentación	Peso ponderado	Tipo envoltura	Peso ponderado
c45	113,93	0,572	363,7	0,520	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c46	59,19	0,297	261,2	0,374	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c47	55,43	0,278	252,7	0,361	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c48	59,1	0,297	230,1	0,329	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c49	78,28	0,393	305,1	0,436	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c50	56,01	0,281	228,1	0,326	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c51	109,39	0,549	409,1	0,585	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c52	82,63	0,415	272,6	0,390	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c54	50,71	0,255	167,4	0,239	11	0,500	Pilares de Hormigón	0,382	Madera	0,196
c55	54,57	0,274	171,7	0,246	6	0,273	Pilares de Hormigón	0,382	Madera	0,196
c56	112,25	0,564	247	0,353	8	0,364	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c57	78,38	0,394	226	0,323	8	0,364	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c58	78,66	0,395	164,3	0,235	8	0,364	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c59	108,81	0,546	152,2	0,218	7	0,318	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c60	57,32	0,288	69,9	0,100	6	0,273	Radier	0,202	Madera	0,196
c61	89,21	0,448	227,1	0,325	9	0,409	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c62	79,69	0,400	221,4	0,317	9	0,409	Radier	0,202	Fibrocemento	0,300
c63	78,93	0,396	226,5	0,324	10	0,455	Pilares de madera	0,416	Fibrocemento	0,300
c64	132,03	0,663	255,2	0,365	9	0,409	Radier	0,202	Fibrocemento	0,300
c83	104,99	0,527	386,1	0,552	22	1,000	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c84	158,24	0,794	152,2	0,218	10	0,455	Pilares de Hormigón	0,382	Plancha de Zinc	0,377
c85	87,47	0,439	250,3	0,358	9	0,409	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocemento	0,300
c86	124,4	0,625	218,4	0,312	15	0,682	Pilares de madera	0,416	Plancha de Zinc	0,377
c101	65,51	0,329	28,9	0,041	9	0,409	Pilares de Hormigón	0,382	Madera	0,196

c116	75,5	0,379	176,2	0,252	15	0,682	Radier	0,202	Fibrocimiento	0,300
c118	63,09	0,317	108,5	0,155	5	0,227	Radier	0,202	Madera	0,196
c119	48,67	0,244	101,3	0,145	6	0,273	Radier	0,202	Madera	0,196
c121	107,15	0,538	128,1	0,183	10	0,455	Radier	0,202	Madera	0,196
c122	109,77	0,551	133,6	0,191	12	0,545	Pilares de madera	0,416	Plancha de Zinc	0,377
c124	64,87	0,326	132	0,189	9	0,409	Radier	0,202	Fibrocimiento	0,300
c126	81,05	0,407	194,5	0,278	10	0,455	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocimiento	0,300
c154	175,52	0,881	186,5	0,267	10	0,455	Radier	0,202	Plancha de Zinc	0,377
c165	127,43	0,640	268,5	0,384	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c167	47,91	0,241	128	0,183	9	0,409	Pilares de madera	0,416	Madera	0,196
c168	49,13	0,247	120,6	0,172	9	0,409	Pilares de madera	0,416	Madera	0,196
c172	75,08	0,377	171,6	0,245	6	0,273	Pilares de Hormigón	0,382	Fibrocimiento	0,300
c173	158,28	0,795	209,4	0,299	10	0,455	Radier	0,202	Madera	0,196
c174	199,18	1	455,6	0,652	12	0,545	Pilares de Hormigón	0,382	Madera	0,196
c176	107,18	0,538	150,1	0,215	7	0,318	Radier	0,202	Madera	0,196
c178	81,47	0,409	175,1	0,250	10	0,455	Radier	0,202	Madera	0,196
c179	79,66	0,400	129,3	0,185	10	0,455	Radier	0,202	Fibrocimiento	0,300
c180	122,87	0,617	302,8	0,433	14	0,636	Radier	0,202	Madera	0,196
c181	62,5	0,314	121,5	0,174	6	0,273	Radier	0,202	Madera	0,196
c182	54,69	0,275	210,8	0,301	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c183	61,63	0,309	225,4	0,322	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c184	95,44	0,479	313,5	0,448	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c185	60,09	0,302	199,9	0,286	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c186	56,38	0,283	253,6	0,363	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c188	54,22	0,272	244,4	0,349	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c189	54,64	0,274	258,9	0,370	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c190	60,11	0,302	274,9	0,393	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c191	56,99	0,286	260,1	0,372	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c192	57,27	0,288	266,5	0,381	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c193	75,43	0,379	294,3	0,421	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c194	58,13	0,292	241,2	0,345	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c195	58,91	0,296	236	0,337	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196

c196	60,07	0,302	222,6	0,318	11	0,500	Radier	0,202	Madera	0,196
c197	60,33	0,303	203,3	0,291	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c198	56,01	0,281	208,6	0,298	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c199	59,55	0,299	253,5	0,363	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c398	110,32	0,554	306,1	0,438	18	0,818	Radier	0,202	Plancha de Zinc	0,377
c399	138,44	0,695	224,2	0,321	9	0,409	Radier	0,202	Plancha de Zinc	0,377
c405	98,05	0,492	292,1	0,418	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c407	110,4	0,554	57,7	0,083	9	0,409	Radier	0,202	Plancha de Zinc	0,377
c584	161,03	0,808	424,8	0,607	13	0,591	Radier	0,202	Fibro cemento	0,300
c585	150,96	0,758	284,1	0,406	6	0,273	Radier	0,202	Madera	0,196
c597	175,79	0,883	302,9	0,433	12	0,545	Radier	0,202	Madera	0,196
c600	181,12	0,909	699,3	1,000	15	0,682	Pilares de Hormigón	0,382	Fibro cemento	0,300
c602	143,77	0,722	501,7	0,717	14	0,636	Pilares de madera	0,416	Madera	0,196
c605	53,01	0,266	13	0,019	6	0,273	Radier	0,202	Plancha de Zinc	0,377

Anexo 2. Tabla Inventario modelo de proceso

Código vivienda	FNE fachada A	FNE fachada B	FNE fachada C	FNE fachada D	Max FNE por vivienda	Max FNE Normalizado	C.M fachada A	C.M fachada B	C.M fachada C	C.M fachada D	Max C.M por vivienda	Proceso	Max C.M Normalizados
c45	235,2	125,8	82,54	143,2	235,2	0,293	0,047	0,011	-0	0,131	0,131	Erosión	0,533
c46	144,9	42,75	0	175,7	175,68	0,219	-0	0	-0	0	-0,004	Sedimentación	0,016
c47	168,6	75,39	95,19	193,6	193,57	0,241	-0	0	0,019	-0,003	0,019	Erosión	0,077
c48	155,9	75,6	130,5	159,9	159,86	0,199	-0	0	-0,02	-0,016	-0,019	Sedimentación	0,077
c49	52,3	89,75	64,43	137,1	137,09	0,171	0	0	0	0,007	0,007	Erosión	0,028
c50	121,8	107,5	0	126,3	126,34	0,157	-0,01	0	0	-0,006	0,009	Erosión	0,037
c51	59,62	80,64	50,43	112,1	112,12	0,140	0	0	0	0,003	0,003	Erosión	0,012
c52	62,95	85,55	37,72	91,21	91,21	0,114	0	0	0	0	0	Nulo	0
c54	212,5	192,9	250,7	241	250,68	0,312	0	0	0	0	0	Nulo	0
c55	328	70,84	186,9	283,1	327,95	0,409	0	0	0	0	0	Nulo	0
c56	387,5	521,2	156,4	298,5	521,15	0,649	0,007	0,018	-0,04	0,021	-0,036	Sedimentación	0,146
c57	245,2	802,8	306,6	316,8	802,81	1	0,067	0,039	0,062	-0,028	0,067	Erosión	0,272
c58	453,2	714,7	69,31	190	714,65	0,890	0,111	0	-0,05	-0,022	0,111	Erosión	0,451
c59	525,8	613,7	277,3	283,3	613,65	0,764	0,01	0,005	-0,1	0	-0,104	Sedimentación	0,423
c60	578,1	737,5	372	422,3	737,54	0,919	0,013	0	0	0	0,013	Erosión	0,053
c61	224,9	199,5	113	258,5	258,45	0,322	-0,02	-0,002	-0,01	0,025	0,025	Erosión	0,102
c62	156,8	310,8	191,6	284,7	310,76	0,387	-0,01	0,015	0,007	0,015	0,015	Erosión	0,061
c63	263,6	264,1	156,1	204,6	264,09	0,329	0,025	0	-0	0,013	0,025	Erosión	0,102
c64	425,6	426,7	305,5	289,3	426,7	0,532	0,015	0,025	0,023	-0,009	0,025	Erosión	0,102
c83	360,8	717	370,7	217,2	716,99	0,893	0,001	0	0,002	-0,022	-0,022	Sedimentación	0,089
c84	20,7	209,2	130	0	209,2	0,261	0	0	0,004	0	0,004	Erosión	0,016
c85	262,7	455,9	229,1	256,8	455,93	0,568	0,043	-0,041	0,029	0,016	0,043	Erosión	0,175
c86	78,21	383,7	230,8	196,6	383,66	0,478	0,009	-0,01	-0,03	0,077	0,077	Erosión	0,313
c101	124,9	0	109	212,2	212,17	0,264	0	0	0	0	0	Nulo	0
c116	23,49	153,2	62,85	75,46	153,15	0,191	0	0,022	0,054	-0,004	0,054	Erosión	0,220
c118	210,2	346	325,7	246,3	346,01	0,431	-0,01	0,001	0	0	-0,011	Sedimentación	0,045
c119	171	309,5	338	227,5	338	0,421	-0,01	0	0	0	-0,008	Sedimentación	0,033

c121	148,6	156,7	278,2	57,13	278,2	0,347	-0	-0,024	-0,04	0	-0,042	Sedimentación	0,171
c122	119,5	123,7	160,9	169	169,01	0,211	0,024	-0,002	-0,01	-0,009	0,024	Erosión	0,098
c124	485,8	348,2	204,5	133,8	485,78	0,605	0,051	0,03	0,043	-0,002	0,051	Erosión	0,207
c126	31,02	173,9	201,2	34,23	201,24	0,251	0	0	0	0	0	Nulo	0
c154	0	10,06	65,72	41	65,72	0,082	-0	-0,002	0	0	-0,003	Sedimentación	0,012
c165	295,3	453,2	57,75	92,13	453,19	0,565	0	0,021	0	0	0,021	Erosión	0,085
c167	97,9	120,4	104,9	112,8	120,36	0,150	0	-0,002	0,001	0	-0,002	Sedimentación	0,008
c168	298,4	510	97,07	153,1	509,96	0,635	0,078	-0,002	0	-0,053	0,078	Erosión	0,317
c172	285,6	156,8	201,7	37,72	285,63	0,356	0,054	-0,007	-0	-0,044	0,054	Erosión	0,220
c173	108,1	87,41	146,8	64,82	146,83	0,183	-0,02	0	0	0	-0,015	Sedimentación	0,061
c174	135,4	80,76	0	18,46	135,36	0,169	-0	0	0,044	-0,003	0,044	Erosión	0,179
c176	123,7	288,9	0	0	288,86	0,360	0	0	0	0	0	Nulo	0
c178	437,5	275,1	239,5	153,6	437,49	0,545	0,039	-0,011	0	0,049	0,049	Erosión	0,199
c179	468,9	266,7	257,4	206,5	468,85	0,584	0,044	-0,005	0	0,032	0,044	Erosión	0,179
c180	313,2	158,3	197,8	103,1	313,21	0,390	-0,01	-0,025	0,076	0	0,076	Erosión	0,309
c181	168,6	0	35,59	52,47	168,59	0,210	0,064	0	0	-0,117	-0,117	Sedimentación	0,476
c182	176,1	287,8	0	196,2	287,82	0,359	-0	0,009	0	0,009	0,009	Erosión	0,037
c183	228,1	404,8	275,8	176,9	404,8	0,504	-0,02	0,029	0	-0,014	0,029	Erosión	0,118
c184	220,2	453,8	76,34	163,7	453,8	0,565	-0,01	-0,053	-0,01	0,012	-0,053	Sedimentación	0,215
c185	353,8	373,2	220	143,7	373,23	0,465	-0,02	0,045	-0	0	0,045	Erosión	0,183
c186	77,01	23,91	0	28,12	77,01	0,096	0,002	0	0	0	0,002	Erosión	0,008
c188	54,22	101,5	0	24,7	101,54	0,126	0,005	-0,011	0	0	-0,011	Sedimentación	0,045
c189	129,5	157,2	19,8	79,97	157,18	0,196	0,008	-0,004	0	0,005	0,008	Erosión	0,033
c190	126,4	134,8	99,04	29,11	134,81	0,168	0,001	0,003	-0,01	0,003	-0,005	Sedimentación	0,020
c191	145,4	164,4	0	25,34	164,37	0,205	0,009	0,001	0	-0,002	0,009	Erosión	0,037
c192	27,33	164	124,4	68,16	163,97	0,204	0	0	-0	0,004	0,004	Erosión	0,016
c193	133,3	168,8	52,73	51,19	168,75	0,210	0,004	0,005	-0	0	0,005	Erosión	0,020
c194	234,8	291,9	169,9	135,2	291,91	0,364	0,03	-0,009	0,006	-0,009	0,03	Erosión	0,122
c195	292,3	332	164,5	176,2	332,02	0,414	-0,01	0,017	-0,01	0	0,017	Erosión	0,069
c196	287,7	327,4	0	155,4	327,43	0,408	-0,01	-0,036	-0,04	0	-0,036	Sedimentación	0,146
c197	239,7	267,9	127,1	84,55	267,93	0,334	-0,02	0,035	0,012	0	0,035	Erosión	0,142
c198	304,9	293,3	243	77,84	304,88	0,380	-0,05	-0,037	-0,01	0	-0,051	Sedimentación	0,207

c199	0	114	65,29	26,99	113,95	0,142	0	0,008	0,004	0,007	0,008	Erosión	0,033
c398	168,7	227,2	3,74	12,36	227,2	0,283	0,05	0,001	0	0	0,05	Erosión	0,203
c399	0	110,5	43,95	4,02	110,48	0,138	0	-0,014	0	-0,004	-0,014	Sedimentación	0,057
c405	88,05	78,81	177,3	59,16	177,26	0,221	0,007	0	0,022	0,008	0,022	Erosión	0,089
c407	65,76	39,81	101,8	35,44	101,77	0,127	0,003	0	-0,09	0,01	-0,089	Sedimentación	0,362
c584	82,56	324,8	119,3	47,74	324,81	0,405	0,246	0,019	0,052	0,003	0,246	Erosión	1
c585	0	82,53	120,9	97,12	120,94	0,151	-0,01	0	0,06	-0,038	0,06	Erosión	0,244
c597	0	126,4	206,5	11,56	206,54	0,257	0	0	0,01	0	0,01	Erosión	0,041
c600	178,8	100,3	94,55	48,06	178,82	0,223	0,003	-0,011	-0	0	-0,011	Sedimentación	0,045
c602	115,3	68,33	231,4	68,33	231,38	0,288	0,002	0,004	0,002	0,021	0,021	Erosión	0,085
c605	297,1	211,3	184,8	116,4	297,14	0,370	0,104	0	0,041	-0,081	0,104	Erosión	0,423

Anexo 3. Tabla Vulnerabilidad física de las viviendas

Código vivienda	Valor Modelo de proceso	Valor ponderado Impacto	Valor Ponderado C.M	Valor susceptibilidad	Valor Ponderado Superficie	Valor Ponderado Volumen	Valor Ponderado N° total aberturas	C. Geométricas	C. Estructurales	C. Materialidad	Vulnerabilidad	Nivel Vulnerabilidad
c45	0,376	0,192	0,184	0,239	0,188	0,141	0,201	0,529	0,202	0,196	0,338	Muy Alta
c46	0,149	0,143	0,006	0,225	0,097	0,101	0,219	0,417	0,202	0,196	0,170	Baja
c47	0,185	0,158	0,027	0,224	0,091	0,098	0,219	0,408	0,202	0,196	0,196	Media
c48	0,157	0,130	0,027	0,224	0,097	0,089	0,219	0,405	0,202	0,196	0,175	Baja
c49	0,122	0,112	0,010	0,231	0,129	0,118	0,219	0,466	0,202	0,196	0,152	Baja
c50	0,116	0,103	0,013	0,223	0,092	0,088	0,219	0,399	0,202	0,196	0,145	Baja
c51	0,096	0,091	0,004	0,242	0,180	0,159	0,219	0,557	0,202	0,196	0,136	Baja
c52	0,074	0,074	0,000	0,231	0,136	0,106	0,219	0,460	0,202	0,196	0,117	Baja
c54	0,205	0,205	0,000	0,309	0,084	0,065	0,201	0,349	0,382	0,196	0,234	Media
c55	0,268	0,268	0,000	0,300	0,090	0,067	0,109	0,266	0,382	0,196	0,277	Alta
c56	0,476	0,425	0,050	0,357	0,185	0,096	0,146	0,426	0,382	0,300	0,443	Muy Alta
c57	0,749	0,655	0,094	0,349	0,129	0,088	0,146	0,362	0,382	0,300	0,639	Muy Alta
c58	0,739	0,583	0,156	0,347	0,130	0,064	0,146	0,339	0,382	0,300	0,631	Muy Alta
c59	0,647	0,501	0,146	0,350	0,179	0,059	0,128	0,366	0,382	0,300	0,565	Muy Alta
c60	0,62	0,602	0,018	0,203	0,094	0,027	0,109	0,231	0,202	0,196	0,505	Muy Alta
c61	0,246	0,211	0,035	0,354	0,147	0,088	0,164	0,399	0,382	0,300	0,276	Alta
c62	0,275	0,254	0,021	0,259	0,131	0,086	0,164	0,381	0,202	0,300	0,271	Alta
c63	0,251	0,215	0,035	0,371	0,130	0,088	0,182	0,400	0,416	0,300	0,284	Alta
c64	0,383	0,348	0,035	0,271	0,217	0,099	0,164	0,480	0,202	0,300	0,352	Muy Alta
c83	0,616	0,585	0,031	0,392	0,173	0,150	0,401	0,724	0,382	0,300	0,554	Muy Alta
c84	0,176	0,171	0,006	0,394	0,261	0,059	0,182	0,502	0,382	0,377	0,236	Media
c85	0,432	0,372	0,060	0,354	0,144	0,097	0,164	0,405	0,382	0,300	0,411	Muy Alta
c86	0,421	0,313	0,108	0,419	0,205	0,085	0,273	0,563	0,416	0,377	0,420	Muy Alta
c101	0,173	0,173	0,000	0,302	0,108	0,011	0,164	0,283	0,382	0,196	0,208	Media
c116	0,201	0,125	0,076	0,270	0,124	0,068	0,273	0,466	0,202	0,300	0,220	Media
c118	0,298	0,282	0,015	0,204	0,104	0,042	0,091	0,237	0,202	0,196	0,272	Alta
c119	0,287	0,276	0,011	0,203	0,080	0,039	0,109	0,229	0,202	0,196	0,264	Alta

c121	0,286	0,227	0,059	0,224	0,176	0,050	0,182	0,408	0,202	0,196	0,269	Alta
c122	0,172	0,138	0,034	0,406	0,181	0,052	0,219	0,451	0,416	0,377	0,236	Media
c124	0,468	0,396	0,072	0,252	0,107	0,051	0,164	0,322	0,202	0,300	0,409	Muy Alta
c126	0,164	0,164	0,000	0,353	0,133	0,075	0,182	0,391	0,382	0,300	0,216	Media
c154	0,058	0,054	0,004	0,307	0,289	0,072	0,182	0,544	0,202	0,377	0,126	Baja
c165	0,399	0,370	0,029	0,237	0,210	0,104	0,201	0,514	0,202	0,196	0,354	Muy Alta
c167	0,101	0,098	0,003	0,320	0,079	0,050	0,164	0,293	0,416	0,196	0,161	Baja
c168	0,525	0,416	0,109	0,320	0,081	0,047	0,164	0,292	0,416	0,196	0,469	Muy Alta
c172	0,309	0,233	0,076	0,342	0,124	0,067	0,109	0,300	0,382	0,300	0,318	Alta
c173	0,141	0,120	0,021	0,238	0,261	0,081	0,182	0,524	0,202	0,196	0,168	Baja
c174	0,172	0,110	0,062	0,354	0,328	0,177	0,219	0,723	0,382	0,196	0,222	Media
c176	0,236	0,236	0,000	0,219	0,176	0,058	0,128	0,362	0,202	0,196	0,231	Media
c178	0,426	0,357	0,069	0,221	0,134	0,068	0,182	0,384	0,202	0,196	0,370	Muy Alta
c179	0,444	0,383	0,062	0,257	0,131	0,050	0,182	0,364	0,202	0,300	0,393	Muy Alta
c180	0,362	0,256	0,107	0,244	0,202	0,117	0,255	0,575	0,202	0,196	0,330	Alta
c181	0,302	0,138	0,164	0,207	0,103	0,047	0,109	0,259	0,202	0,196	0,276	Alta
c182	0,247	0,235	0,013	0,220	0,090	0,082	0,201	0,372	0,202	0,196	0,240	Media
c183	0,371	0,330	0,041	0,222	0,101	0,087	0,201	0,389	0,202	0,196	0,330	Alta
c184	0,445	0,370	0,074	0,233	0,157	0,121	0,201	0,479	0,202	0,196	0,387	Muy Alta
c185	0,368	0,305	0,063	0,221	0,099	0,077	0,201	0,377	0,202	0,196	0,328	Alta
c186	0,066	0,063	0,003	0,225	0,093	0,098	0,219	0,410	0,202	0,196	0,110	Baja
c188	0,098	0,083	0,015	0,224	0,089	0,095	0,219	0,403	0,202	0,196	0,133	Baja
c189	0,139	0,128	0,011	0,224	0,090	0,100	0,219	0,409	0,202	0,196	0,162	Baja
c190	0,117	0,110	0,007	0,226	0,099	0,107	0,219	0,424	0,202	0,196	0,147	Baja
c191	0,147	0,134	0,013	0,225	0,094	0,101	0,219	0,413	0,202	0,196	0,168	Baja
c192	0,139	0,134	0,006	0,225	0,094	0,103	0,219	0,416	0,202	0,196	0,163	Baja
c193	0,145	0,138	0,007	0,230	0,124	0,114	0,219	0,457	0,202	0,196	0,168	Baja
c194	0,28	0,238	0,042	0,224	0,096	0,093	0,219	0,408	0,202	0,196	0,265	Alta
c195	0,295	0,271	0,024	0,224	0,097	0,091	0,219	0,407	0,202	0,196	0,275	Alta
c196	0,318	0,267	0,050	0,222	0,099	0,086	0,201	0,386	0,202	0,196	0,292	Alta
c197	0,268	0,219	0,049	0,223	0,099	0,079	0,219	0,397	0,202	0,196	0,256	Media
c198	0,32	0,249	0,072	0,222	0,092	0,081	0,219	0,392	0,202	0,196	0,293	Alta

c199	0,104	0,093	0,011	0,225	0,098	0,098	0,219	0,415	0,202	0,196	0,137	Baja
c398	0,255	0,185	0,070	0,317	0,182	0,119	0,328	0,628	0,202	0,377	0,272	Alta
c399	0,11	0,090	0,020	0,300	0,228	0,087	0,164	0,479	0,202	0,377	0,162	Baja
c405	0,175	0,145	0,031	0,234	0,161	0,113	0,219	0,493	0,202	0,196	0,191	Media
c407	0,208	0,083	0,125	0,286	0,182	0,022	0,164	0,368	0,202	0,377	0,229	Media
c584	0,61	0,265	0,345	0,293	0,265	0,165	0,237	0,667	0,202	0,300	0,523	Muy Alta
c585	0,183	0,099	0,084	0,231	0,249	0,110	0,109	0,468	0,202	0,196	0,196	Media
c597	0,183	0,169	0,014	0,250	0,289	0,117	0,219	0,626	0,202	0,196	0,201	Media
c600	0,161	0,146	0,015	0,407	0,298	0,271	0,273	0,843	0,382	0,300	0,229	Media
c602	0,218	0,189	0,029	0,367	0,237	0,194	0,255	0,686	0,416	0,196	0,259	Media
c605	0,388	0,242	0,146	0,267	0,087	0,005	0,109	0,202	0,202	0,377	0,355	Muy Alta

Anexo 4. Tabla Daño esperado

Código vivienda	Valor total de reconstrucción	Vulnerabilidad	Daño esperado
c45	\$31.715.701	0,338	\$10.719.907
c46	\$16.474.418	0,170	\$2.800.651
c47	\$15.490.225	0,196	\$3.036.084
c48	\$16.450.860	0,175	\$2.878.901
c49	\$21.949.216	0,152	\$3.336.281
c50	\$15.642.042	0,145	\$2.268.096
c51	\$30.458.620	0,136	\$4.142.372
c52	\$23.112.833	0,117	\$2.704.201
c54	\$13.210.293	0,234	\$3.091.209
c55	\$14.199.297	0,277	\$3.933.205
c56	\$29.385.700	0,443	\$13.017.865
c57	\$20.579.399	0,639	\$13.150.236
c58	\$20.615.510	0,631	\$13.008.387
c59	\$28.496.811	0,565	\$16.100.698
c60	\$15.454.525	0,505	\$7.804.535
c61	\$23.377.850	0,276	\$6.452.286
c62	\$22.050.887	0,271	\$5.975.790
c63	\$23.286.758	0,284	\$6.613.439
c64	\$36.283.734	0,352	\$12.771.874
c83	\$27.509.731	0,554	\$15.240.391
c84	\$40.891.536	0,236	\$9.650.402
c85	\$22.928.237	0,411	\$9.423.505
c86	\$36.279.982	0,420	\$15.237.592
c101	\$16.996.290	0,208	\$3.535.228
c116	\$20.968.199	0,220	\$4.613.004
c118	\$16.969.627	0,272	\$4.615.739
c119	\$13.125.929	0,264	\$3.465.245
c121	\$29.262.057	0,269	\$7.871.493
c122	\$32.375.943	0,236	\$7.640.722
c124	\$17.801.683	0,409	\$7.280.888
c126	\$21.233.081	0,216	\$4.586.346
c154	\$47.729.446	0,126	\$6.013.910
c165	\$35.433.672	0,354	\$12.543.520
c167	\$14.154.850	0,161	\$2.278.931
c168	\$13.563.875	0,469	\$6.361.457
c172	\$19.690.445	0,318	\$6.261.562
c173	\$43.556.692	0,168	\$7.317.524
c174	\$51.661.811	0,222	\$11.468.922
c176	\$29.862.965	0,231	\$6.898.345
c178	\$22.345.002	0,370	\$8.267.651
c179	\$22.030.640	0,393	\$8.658.042

c180	\$33.492.854	0,330	\$11.052.642
c181	\$17.399.000	0,276	\$4.802.124
c182	\$15.219.606	0,240	\$3.652.705
c183	\$17.171.274	0,330	\$5.666.520
c184	\$26.654.879	0,387	\$10.315.438
c185	\$16.700.625	0,328	\$5.477.805
c186	\$15.729.520	0,110	\$1.730.247
c188	\$15.096.582	0,133	\$2.007.845
c189	\$15.206.519	0,162	\$2.463.456
c190	\$16.705.861	0,147	\$2.455.761
c191	\$15.889.189	0,168	\$2.669.384
c192	\$15.962.480	0,163	\$2.601.884
c193	\$21.190.723	0,168	\$3.560.041
c194	\$16.187.588	0,265	\$4.289.711
c195	\$16.391.756	0,275	\$4.507.733
c196	\$16.695.390	0,292	\$4.875.054
c197	\$16.830.994	0,256	\$4.308.735
c198	\$15.632.671	0,293	\$4.580.373
c199	\$16.559.279	0,137	\$2.268.621
c398	\$29.975.441	0,272	\$8.153.320
c399	\$37.560.417	0,162	\$6.084.788
c405	\$27.338.056	0,191	\$5.221.569
c407	\$30.063.807	0,229	\$6.884.612
c584	\$44.322.359	0,523	\$23.180.594
c585	\$41.633.605	0,196	\$8.160.186
c597	\$48.352.819	0,201	\$9.718.917
c600	\$47.012.454	0,229	\$10.765.852
c602	\$41.956.757	0,259	\$10.866.800
c605	\$14.438.971	0,355	\$5.125.835