

Método CRET: Una propuesta para incorporar áreas de riesgo concatenado sismo-tsunami en la planificación territorial chilena

Simón Inzunza. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, Chile.

Carolina Martínez. Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), Santiago, Chile.

RESUMEN | Ante la ausencia metodológica para cuantificar riesgo concatenado sismo-tsunami en Chile, CRET (*Concatenated Risk by Earthquake-Tsunami*) es una propuesta para estimar (con Sistemas de Información Geográfica, datos de bases públicas y encuestas) los impactos de un tsunami una vez ocurrido un sismo, como insumo a la incorporación de áreas de riesgo en los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT). CRET fue aplicado en la localidad de San Sebastián, municipio de Cartagena, Chile. Se encontró que 43 manzanas censales estaban expuestas a riesgo concatenado ante un escenario tsunamigénico similar al generado por el sismo de 1730, de las cuales 5 tuvieron riesgo bajo (11,6%), 13 resultaron en riesgo medio (30,3%) y 25 alcanzaron riesgo alto (58,1%). Mediante el establecimiento de tres niveles de riesgo y un enfoque de gestión prospectiva del riesgo, se generaron disposiciones para la adaptabilidad de elementos expuestos, se establecieron exigencias para nuevos usos de suelo y se indicaron lineamientos para un plan integral de reducción del riesgo.

PALABRAS CLAVE | riesgos naturales, planificación territorial, vulnerabilidad.

ABSTRACT | *Due to the absence of a methodological approach to quantify concatenated risk by earthquake-tsunami in Chile, CRET (Concatenated Risk by Earthquake-Tsunami) is a proposal to estimate, using Geographic Information Systems, publicly available data and surveys, the impacts of a tsunami following an earthquake, as input for the incorporation of risk areas into Territorial Planning Instruments (TPI). CRET was applied in the locality of San Sebastián, municipality of Cartagena, Chile. It was found that 43 census blocks were exposed to concatenated risk in a scenario similar to that of the 1730 earthquake, of which 5 had low risk (11.6%), 13 resulted in medium risk (30.3%), and 25 reached high risk (58.1%). By establishing three levels of risk and through a prospective risk management approach, provisions were created for the adaptability of exposed elements, requirements were set for new land uses, and guidelines were provided for a comprehensive risk reduction plan.*

KEYWORDS | *natural risks, territorial planning, vulnerability.*

Recibido el 10 de octubre de 2023, aprobado el 23 de marzo de 2024.
E-mails: simon.inzunza@cigiden.cl | carolina.marine@gmail.com

Introducción

El riesgo de desastre es la probabilidad de daños y pérdidas sociales y económicas debido a la ocurrencia de una o más amenazas naturales (sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, etc.) y la medida en que las personas y las edificaciones son susceptibles a ellas, condición denominada vulnerabilidad (Depietri, 2019). Tal condición depende, entre otras, de aquellas características socioeconómicas, culturales, educativas y demográficas en el caso de la vulnerabilidad social (personas), y de la materialidad en cuanto a la vulnerabilidad física (edificaciones) (Sandoval, 2020). El desastre, en tanto, ocurre en la materialización del riesgo.

A nivel mundial, de los años 2000 al 2019, entre las amenazas naturales destacan el riesgo y desastres ante eventos sismo-tsunami. Ellos han causado más de 720.000 muertes, cifra que representa un 58% de fallecidos a causa de desastres en un periodo de veinte años (Cortez et al., 2022). Especial mención merecen, entre ellos, los eventos de Indonesia 2004 (Matsumaru, 2015), Chile 2010 (Aránguiz et al., 2020) y Japón 2011 (Valenzuela et al., 2019). Chile, en particular, sobresale por ser uno de los países más expuestos al riesgo de desastre ante la amenaza sismo-tsunami, por la localización de su costa frente a una zona de subducción cortical (Ruiz & Madariaga, 2018). Solo en los últimos quinientos años se han generado 38 terremotos destructivos, de los cuales 27 originaron tsunamis devastadores (modificado de Carena, 2011). Además, son las amenazas naturales que más preocupan a la población chilena (Bronfman et al., 2016).

A pesar de lo anterior, las acciones para la reducción del riesgo ante estas amenazas aún presentan brechas en prevención y se han enfocado en la respuesta a la emergencia en contextos posdesastre, principalmente desde la óptica de la planificación territorial, mediante planes de reconstrucción y la relocalización colectiva de asentamientos (Moris et al., 2017). Sin embargo, en el marco de esta lógica de “urbanismo después de los desastres” (Lara et al., 2021), y particularmente en el caso de relocalizaciones, se han observado, a mediano plazo, diversos impactos socioterritoriales negativos; entre ellos, exposición a nuevas amenazas, pérdidas de suelos agrícolas y área naturales, aumento de tiempo y costos de traslado (dependencia del automóvil), bajo acceso a servicios y la alteración del tejido social previo (Kondo & Lizarralde, 2021). Incluso, existe evidencia de ocasiones en que la población relocalizada ha vuelto a su asentamiento original (Tapia, 2015).

Sobre esto, para reducir el riesgo actual y futuro y, además, evitar situaciones de “mala-adaptación urbana” como las descritas en el párrafo anterior (Kondo & Lizarralde, 2021), se requiere una transición que permita migrar de la cultura de la respuesta ante la emergencia (enfoque reactivo), hacia una estrategia que se centre en la resiliencia y adaptación (gestión prospectiva). El camino para ello es la inclusión del riesgo dentro del marco legal urbanístico y territorial, de tal manera que se desarrollen acciones que garanticen que el riesgo y sus factores no se consoliden en el tiempo y en el territorio (Narváez et al., 2009; Rinaldi & Bergamini, 2020).

Según Rodríguez (2017), la gestión prospectiva del riesgo en la planificación territorial debe apuntar al desarrollo de un sistema urbano resiliente en donde se reconozca que existen fluctuaciones ambientales para la adaptabilidad del territorio

en cuestión; es decir, configurar acciones para que dicho sistema urbano (social, natural y construido) posea capacidad de actuación y recuperación ante dichas amenazas, manteniendo sus funciones.

Los estudios de riesgo en la planificación territorial. Propuesta del método CRET
Para Narváez et al. (2009), con el fin de lograr una planificación territorial promotora de resiliencia y adaptación, es clave la inclusión y análisis, a través de estudios de riesgo, de los escenarios de riesgo existentes, los cuales permiten conocer las áreas y poblaciones que serían más afectadas por la ocurrencia de un desastre, posibilitando aplicar normativas de uso de suelo y medidas para garantizar la seguridad de las personas y la infraestructura expuesta (Greiving et al., 2021). En tal sentido, en los últimos años se ha pasado desde una carencia de tratamiento del riesgo en los procesos de planificación territorial, hacia la aprobación de normativas que obligan a la inclusión de análisis de riesgo en la documentación necesaria para su desarrollo (Olcina, 2008).

El problema, no obstante, es que los estudios de riesgo se han limitado al análisis de amenazas individuales, y en algunos casos incluyen solo aspectos específicos de la vulnerabilidad (características sociales o materialidad de las construcciones), lo cual podría llevar a subestimar el nivel de riesgo y limitar la eficacia de las disposiciones urbanísticas de la planificación territorial. Esto, debido a que las amenazas naturales que abarcan una misma área y pueden actuar en conjunto o relacionadas (como es el caso de sismos que originan tsunamis), no se evalúan integralmente y en esos casos no se contempla, además, la complejidad de componentes que definen la vulnerabilidad y el riesgo (Skilodimou et al., 2019).

En el marco señalado anteriormente, se establece un escenario de multirriesgo o riesgo concatenado cuando un conjunto de amenazas diferentes (que se relacionan y pueden coincidir o no cronológicamente) impactan un territorio determinado (Curt, 2021; Lavell & Lavell, 2020). Por tal motivo se habla de riesgo concatenado ante sismo y tsunami.

Actualmente, existen evaluaciones multirriesgo correspondientes a herramientas y métodos cuantitativos que integran las amenazas, sus efectos concatenados y la vulnerabilidad física desde un enfoque probabilístico (Gallina et al., 2016), perspectiva en la cual destacan los árboles de eventos y simulaciones de Monte Carlo (Fleming et al., 2011). Sin embargo, tales métodos suponen una gran cantidad de datos y requerimientos técnicos y económicos que normalmente no están disponibles en países en desarrollo; aún más, no integran elementos de vulnerabilidad social, por lo que no son atractivos para tomadores de decisiones (Barría et al., 2019; Curt, 2021).

Por ello, a pesar de que estudiar y evaluar el riesgo concatenado es un campo investigativo incipiente (Greiving et al., 2021), se deben generar metodologías simples para una evaluación multirriesgo, instrumentos que se ajusten a las características locales y las necesidades de zonas propensas a ser afectadas por múltiples amenazas naturales y que, además, posean datos insuficientes (Barría et al., 2019). Para ello, Skilodimou et al. (2019) señalan que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrecen una oportunidad para el desarrollo de este tipo de metodologías y

su incorporación en la planificación territorial, pues permiten análisis mediante la integración de diferentes capas de datos. Por otro lado, debido a la complejidad del tratamiento de amenazas múltiples, Kumbier et al. (2018) reconocen que los escenarios determinísticos pueden ser una primera aproximación para su tratamiento; y, tras el desastre de Japón en 2011, se recomienda basarse en el peor escenario conocido (Kondo & Lizarralde, 2021). Por último, se debe incorporar vulnerabilidad social y física (Curt, 2021).

De esta manera, se propone el método CRET (abreviación de *Concatenated Risk by Earthquake-Tsunami*), el cual corresponde a una metodología para evaluar riesgo concatenado sismo-tsunami mediante datos disponibles en bases públicas y encuestas, y su integración con análisis multicriterio y álgebra de mapas en SIG.

La importancia de una metodología orientada a evaluar riesgo concatenado sismo-tsunami para planificación territorial es que, ante la ocurrencia de una amenaza de rango extraordinario, se reconoce que una deficiencia en esta materia genera pérdidas económicas y sociales importantes para una comunidad (Field et al., 2012). Así, mediante la zonificación de niveles de riesgo concatenado sismo-tsunami con CRET, se apunta a alterar las interacciones entre los componentes de aquel riesgo, seleccionando para ello las normas urbanísticas y medidas de mitigación apropiadas, en consideración de las características propias y relacionadas de tales amenazas (Greiving et al., 2021).

Planificación territorial para la reducción del riesgo en Chile

En Chile existen diversos Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), entre los cuales destacan los Planes Reguladores Comunes (PRC), instrumentos normativos que establecen las condiciones que deben cumplir las edificaciones y espacios públicos, además de definir usos de suelo en terrenos de áreas urbanas (Moris et al., 2017). En este sentido, una de las zonificaciones de suelo corresponde a las áreas de riesgo, las cuales, de acuerdo al artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), son “territorios en los cuales, previo estudio fundado, se limita determinado tipo de construcciones por razones de seguridad contra desastres naturales u otros semejantes, que requieran para su utilización la incorporación de obras de ingeniería o de otra índole suficientes para subsanar o mitigar tales efectos” (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2022).

Sin embargo, de acuerdo con Vicuña y Schuster (2021), actualmente no existen metodologías estandarizadas para evaluar riesgo en los estudios de riesgo de los IPT y se suele asociar el concepto de amenaza a riesgo, por lo que finalmente las áreas de riesgo de los PRC quedan restringidas a zonificaciones de amenazas. Lo anterior se basa en la limitación e imprecisiones que impone el propio artículo 2.1.17 de la OGUC, tanto en el establecimiento de metodologías estandarizadas como en la definición de riesgo.

Por otro lado, según Rinaldi y Bergamini (2020), los procesos de elaboración o actualización de los PRC son “lentos y engorrosos”, con una duración en torno a siete años, lo que se explica, entre otros, por el marco normativo existente, ausencia de equipos técnicos capacitados en muchas municipalidades y la carencia de recursos económicos. En el contexto de la reducción del riesgo de desastre esto es

problemático, pues recién tras el desastre sismo-tsunami ocurrido el 27 de febrero de 2010 –conocido como el 27F–, se reveló la necesidad de modificar los PRC de los municipios afectados para incorporar áreas de riesgo (Moris et al., 2017). Así, la reducción del riesgo aún no se integra sistemáticamente en la planificación territorial (Vicuña & Schuster, 2021).

Actualmente, a través de la renovación del marco relativo a riesgos y planificación territorial mediante la Política Nacional de Ordenamiento Territorial (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2019) y de la Ley 21.364, que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, SINAPRED (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2021), se están gestando lineamientos para incorporar la noción de riesgo de desastre a través de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad. En esa línea, hoy se encuentra en desarrollo metodologías para lograr aquello y, aún más, existen investigaciones que plantean incorporar todos los riesgos y amenazas a la planificación territorial, incluso con enfoque de multirriesgo (Moris et al., 2017; Barría et al., 2019). Desde esta perspectiva, CRET aparece como un insumo metodológico base para incorporar el riesgo como tal a los IPT, en el sentido de que integra amenaza y vulnerabilidad física-estructural y social y considera, además, la complejidad y dinámica de las amenazas y desastres; en este caso, sismos que originan tsunamis como efecto concatenado en zonas costeras.

La ventaja de la aplicación de CRET en los IPT es que las Secretarías Comunes de Planificación (SECPA) de los municipios, en tanto entes encargados de diseñar y desarrollar los PRC (Vicuña & Schuster, 2021), podrán incorporar áreas de riesgo concatenado en zonas costeras a partir de información disponible en bases de datos públicas e, idealmente, a través de encuestas a la población residente en áreas expuestas a sismo-tsunami, lo cual disminuiría el tiempo y los costos económicos necesarios para incorporar estas zonificaciones en los instrumentos.

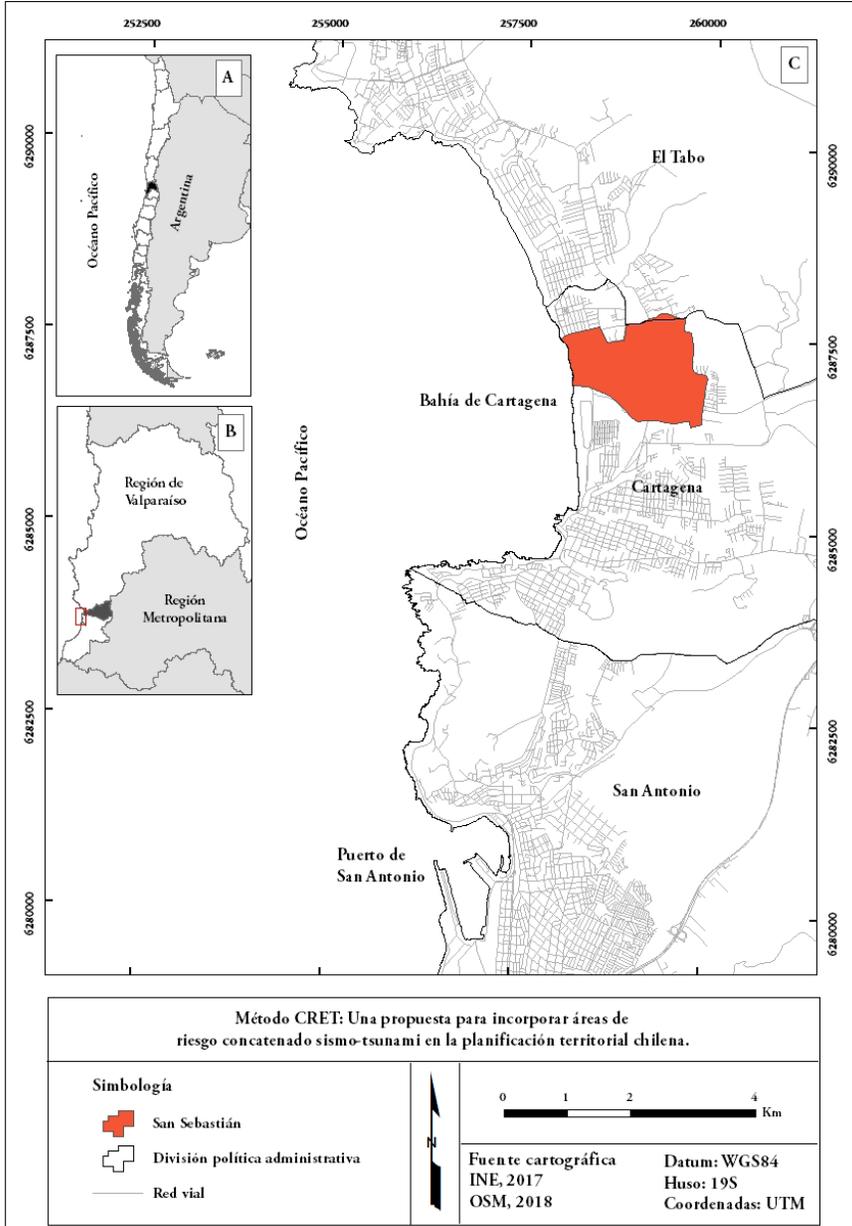
En este contexto, el objetivo general de esta investigación es evaluar la pertinencia de la metodología CRET para las zonificaciones de áreas de riesgo en Instrumentos de Planificación Territorial (IPT), aplicando un piloto en la localidad de un municipio chileno e identificando, además, la oportunidad de aplicación de metodologías cuantitativas en la gestión territorial de municipios costeros susceptibles ante las amenazas sismo-tsunami.

Metodología

Área de estudio

La aplicación piloto de CRET se realizó en la localidad de San Sebastián, municipio de Cartagena, Región de Valparaíso, Chile (Figura 1), que según el Censo 2017 tenía una población de 2.792 personas. San Sebastián se consolidó como asentamiento en la segunda mitad del siglo XX, asociado a la venta de lotes para segundas residencias y la formación de cooperativas de propietarios. Actualmente se caracteriza por un turismo masivo estacional de población de estratos socioeconómicos bajos y medio-bajos (Carraro et al., 2021).

FIGURA 1 | Área de aplicación piloto de CRET



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El área, inserta en el sistema costero bahía de Cartagena, se ubica frente a una zona de subducción cortical, con la consecuente generación de sismos de campo cercano y tsunamis (Martínez et al., 2020). Si bien se han evidenciado sismos tsunamigénicos de campo cercano en los años 1730, 1822, 1906 y 1985 (Ruiz & Saragoni, 2005), desde 1730 se ha configurado una zona de brecha sísmica, en la cual no se han producido deslizamientos corticales de importancia y someros que produzcan grandes tsunamis (Carvajal et al., 2017).

El riesgo de desastre adquiere relevancia en la localidad señalada por la creciente urbanización de áreas expuestas (1.980 personas habitan bajo los 30 msnm), el aumento de población flotante en época estival (Carraro et al., 2021), los altos niveles de vulnerabilidad social, la antropización de ecosistemas costeros, principalmente dunas y humedales (Martínez et al., 2020), además de la presencia de asentamiento irregulares (Carraro et al., 2021). Aún más, no hay áreas de riesgo incorporadas en el PRC de Cartagena vigente desde 1995, permitiéndose la construcción de viviendas, equipamientos, industrias y almacenamiento inofensivo en zonas inundables.

Esta investigación se realizó en el contexto de una tesis de magíster, por lo cual CRET opta por la escala de localidad, ya que, al ser una propuesta piloto, es una unidad en la cual se considera factible levantar y analizar datos en un periodo aproximado de seis meses para establecer su validez y replicabilidad a otras escalas.

Método CRET

La secuencia metodológica de CRET, y según lo señalado por Kappes et al. (2012) para la evaluación del riesgo ante más de una amenaza, integra el relato de amenaza concatenada, en el cual primero ocurre un sismo de gran magnitud frente a la costa en zona de subducción, y posteriormente se genera un tsunami. Se considera, además, que las amenazas concatenadas o secundarias pueden ser un factor de expansión de los impactos de la amenaza primaria, resultando en efectos acumulativos (Imamura et al., 2019). En este sentido, se evalúa la afectación del tsunami, una vez ocurrido un sismo.

CRET consta de dos secciones principales: 1) evaluación del riesgo sísmico; y 2) integración de la amenaza de tsunami al riesgo sísmico para evaluar riesgo concatenado.

El método propuesto es fundamentalmente cuantitativo, en el cual, en un entorno SIG, los componentes del riesgo concatenado se evaluaron e integraron a través de álgebra de mapas desde parámetros definidos en un análisis multicriterio, dando como resultado final un modelado cartográfico. Se zonificaron tres niveles de riesgo como insumo a los IPT –específicamente, nivel bajo, medio y alto–, de acuerdo con recomendaciones de la Comisión Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU, 2019), por lo cual todos los componentes del riesgo concatenado sismo-tsunami son evaluados en tres niveles.

Para estimar los niveles de componentes del riesgo y el riesgo concatenado, se tomó de referencia la matriz de riesgo de Eckert et al. (2012), el cual utiliza multiplicación (Tabla 1).

TABLA 1 | Matriz de riesgo

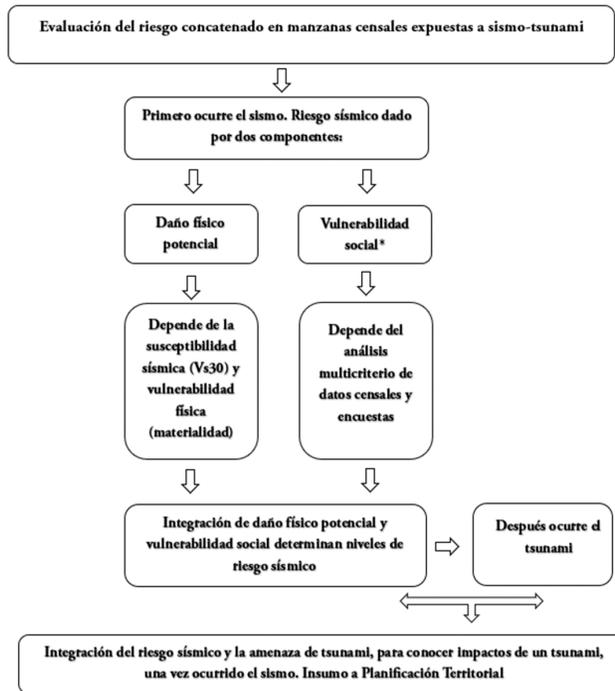
X		COMPONENTE 2		
Componente 1	Nivel	Baja (1)	Media (2)	Alta (3)
	Bajo (1)	$B 1 \times 1 = 1$	$B 1 \times 2 = 1$	$M 1 \times 3 = 3$
	Medio (2)	$B 2 \times 1 = 2$	$M 2 \times 2 = 4$	$A 2 \times 3 = 6$
	Alto (3)	$M 3 \times 1 = 3$	$A 3 \times 2 = 6$	$A 3 \times 3 = 9$

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE ECKERT ET AL. (2012)

Sobre lo anterior, unidades con valores de 1 a 2 en la multiplicación de dos variables o componentes tienen nivel bajo en el componente del riesgo evaluado; unidades que resulten en 3 o 4 significan nivel medio, mientras que unidades con cifras de 6 o 9 establecen nivel alto en el componente del riesgo respectivo. La unidad de análisis de CRET alude a la manzana censal.

Por otro lado, para el caso de vulnerabilidad social, se opta por aplicar encuestas debido al escaso número de variables cartografiadas por manzana disponibles en el censo (instrumento acotado) y, asimismo, para capturar elementos como la organización comunitaria, la educación en torno a las amenazas y otras subjetividades (Zhou et al., 2014). En la Figura 2 se resume el esquema metodológico de CRET, el cual será detallado en las siguientes subsecciones.

FIGURA 2 | Esquema metodológico CRET



*Algunas variables de vulnerabilidad social evaluadas en riesgo sísmico, pueden profundizar impacto del tsunami.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Evaluación del riesgo sísmico

El riesgo sísmico depende del daño físico potencial y la vulnerabilidad social (Derakhshan et al., 2020).

Daño físico potencial

El daño físico potencial está integrado, en primera instancia, por la susceptibilidad sísmica del suelo a través del parámetro V_{s30} , el cual establece la velocidad promedio de onda de corte en los primeros 30 metros del perfil del terreno, para determinar tipos de suelos con características similares de amplificación (Crespo et al., 2022). A mayor V_{s30} , mayor es la competencia del suelo respectivo y menor la probabilidad de amplificación de las ondas sísmicas (Tabla 2).

Como referencia, para el sismo de campo cercano del 3 de marzo de 1985 en la Región de Valparaíso (Mw 8,0), suelos D-E alcanzaron intensidad sísmica IX en la escala MSK, lo cual establece daño generalizado en las construcciones (Sepúlveda et al., 2019).

TABLA 2 | Susceptibilidad sísmica según V_{s30} del tipo de suelo

TIPO DE SUELO	V_{s30}	UNIDAD GEOLÓGICA (EJEMPLOS)	DESCRIPCIÓN DEL SUELO	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	SUSCEPTIBILIDAD SÍSMICA
A-B	>500	PzTrmv, Trca, TrJtv	Unidades de roca, suelo cementado, roca blanda o fracturada, suelo muy denso.	Macizo rocoso.	Baja
C	400-500	Tn, Tna, TrJtv, Tqpa	Suelos densos o medianamente densos, suelos firmes.	Terraza, planicie artificial.	Media
D-E	0-400	Haal, Qa, Qf, Qfs, Qd, Qe	Suelo medianamente denso o medio firme, suelo de compacidad o consistencia mediana. Depósitos litorales y eólicos actuales.	Playa, terraza fluvio-marina, terraza fluvial, terraza aluvial, duna.	Alta

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RAULD ET AL. (2015) Y SEPÚLVEDA ET AL. (2019)

Por otro lado, el daño físico potencial depende de la vulnerabilidad física de las construcciones, condición que está determinada, en primera instancia, por el año de construcción (establece si poseen la norma sísmica NCh433) y, además, por la materialidad predominante por manzana según metro cuadrado (Tabla 3). Para ello, se hizo uso de la base catastral de propiedades del Servicio de Impuestos Internos (SII) para el año 2022 y el análisis se desarrolló en R-Script.

TABLA 3 | Vulnerabilidad física de las construcciones

CONDICIÓN ESPECIAL	MATERIALIDAD	VULNERABILIDAD FÍSICA
Ausencia de construcciones (área agrícola, por ejemplo).	Concreto – Acero	Baja
-	Madera – Albañilería	Media
Construcción antes de 1972 y/o calidad inferior según base catastral del SII.	Adobe	Alta

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE SUBDERE (2011) Y AGUIRRE ET AL. (2018)

Finalmente, para estimar el daño físico potencial por manzana, mediante álgebra de mapas de la Tabla 1 se multiplicaron los tres niveles de susceptibilidad sísmica (Tabla 2) y vulnerabilidad física (Tabla 3). En tal sentido, manzanas con valores de 1 a 2 tuvieron daño físico potencial bajo; manzanas que resultaron en 3 o 4 significaron daño físico potencial medio, mientras que manzanas con cifras de 6 o 9 establecieron daño físico potencial alto de las construcciones ante sismos.

Vulnerabilidad social

La vulnerabilidad social alude a las características de una persona o grupo en relación con su capacidad para anticiparse, sobrevivir, resistir y recuperarse de los impactos de una amenaza natural, lo cual depende, según Cutter et al. (2003), de factores demográficos, culturales y socioeconómicos, y está condicionado, además, por procesos económicos, políticos e históricos (Sandoval, 2020). En la Tabla 4 se presentan las diecinueve variables utilizadas e indicadores para caracterizar la vulnerabilidad social frente al riesgo sísmico. Cabe destacar, además, que se consideraron variables donde, por el comportamiento de la población ante el sismo, se pueden profundizar los impactos del tsunami, principalmente aquellas referidas a evacuación.

TABLA 4 | Variables de vulnerabilidad social

VARIABLE	JUSTIFICACIÓN	VULNERABILIDAD BAJA -1	VULNERABILIDAD MEDIA -2	VULNERABILIDAD ALTA -3	FUENTE
Población expuesta	Número de población que puede ser afectada por la amenaza.	0-30 habitantes	31-60 habitantes	> 61 habitantes	Censo
Ingreso por hogar (\$)	Menor acceso a recursos económicos para prepararse o recuperarse de la amenaza.	> \$400.000	Entre \$200.000 y \$400.000	< \$200.000	Encuesta
Actividad económica	Algunas actividades económicas pueden ser aún más afectadas por la amenaza, por lo que se deberá buscar alternativas laborales o asistencia tras el evento.	Actividad productiva fuera de Cartagena (industria, sector terciario).	Actividades de servicios en Cartagena (excluye comercio local).	Pensionado o desempleado; Comercio local; Dueña de casa; Estudiante; Actividades extracurriculares en Cartagena; Industria.	Encuesta
Impacto de la pandemia por Covid-19 en la economía familiar	Capacidad económica mermada para hacer frente a la amenaza durante la recuperación.	Situación mejoró con la pandemia.	Situación se mantuvo con la pandemia.	Situación empeoró con la pandemia.	Encuesta
Migración	Población puede estar no familiarizada con la amenaza (menor capacidad de respuesta).	0%	0,1-3%	>3%	Censo
Porcentaje de niños y adultos mayores	En contexto de respuesta, niños poseen dificultad para tomar decisiones y adultos mayores tienen dificultad de movilidad.	<45%	45-50%	>50%	Censo
Acceso a agua potable	Disponer de agua potable en cantidad y calidad es clave para la recuperación (consumo, higiene, actividades económicas, servicios de enfermería, etc.).	Red pública	Pozo, camión aljibe	Vertiente natural	Censo
Porcentaje de mujeres	Mujeres pueden tener mayores dificultades de recuperación debido a salarios más bajos y responsabilidades de cuidado familiar.	<45%	45-50%	>50%	Censo
Conocimiento de la amenaza sismo-tsunami	Capacidad de detectar e identificar la exposición a la amenaza.	Estima que puede ocurrir un evento sismo-tsunami. Está informado y preparado.	Poca información sobre el tema.	Piensa que no puede ocurrir un evento sismo-tsunami en San Sebastián.	Encuesta

VARIABLE	JUSTIFICACIÓN	VULNERABILIDAD BAJA -1	VULNERABILIDAD MEDIA -2	VULNERABILIDAD ALTA -3	FUENTE
Reacción ante el evento sísmico	Capacidad de responder de buena manera ante el evento sísmico en la zona costera.	Ante terremoto que no permite mantenerse en pie, evacúa inmediatamente a zona segura.	Ante terremoto que no permite mantenerse en pie, espera indicaciones de autoridades para actuar.	Ante terremoto que no permite mantenerse en pie, no evacúa de ninguna manera.	Encuesta
Conocimiento de las vías de evacuación y zonas seguras	Identificación de las rutas para correcta evacuación.	Conoce zonas de seguridad y vías de evacuación según lo indicado por organismos correspondientes.	Conoce zonas de seguridad y vías de evacuación según lo indicado por familia o vecinos.	No tiene conocimiento de las zonas de seguridad ni de las vías de evacuación.	Encuesta
Participación en organizaciones de la comunidad	Presencia de redes de apoyo comunitario para recuperación.	Pertenece a una o más organizaciones, con participación regular.	Pertenece a una organización, sin participación regular.	No participa en organizaciones.	Encuesta
Conversación frente al riesgo en la comunidad	Mayor predisposición comunitaria para prepararse ante las amenazas.	Se conversa frecuentemente sobre el riesgo.	En ocasiones se conversa sobre el riesgo.	No se conversa sobre el riesgo.	Encuesta
Calidad de las relaciones en la comunidad	Buena relación entre vecinos implica confianza y cooperación para redes de apoyo en la respuesta.	Buena relación entre vecinos.	Relación regular entre vecinos.	Mala relación entre vecinos.	Encuesta
Inclusión en la toma de decisiones	Una persona incluida en la toma de decisiones posee mayor predisposición a participar en redes de apoyo.	Persona se siente incluida.	La persona se siente incluida solo en ocasiones.	Persona no se siente incluida.	Encuesta
Conocimiento de medidas para la Reducción del Riesgo de Desastre desde autoridades	Mayor capacidad para identificar amenazas/riesgos y reaccionar ante ellos.	Las personas conocen las medidas propuestas para reducir el riesgo.	Las personas conocen medidas propuestas, pero no confían en ellas.	Las personas no conocen ninguna medida, plan o estudio que permita mitigar los riesgos.	Encuesta
Conocimiento del Plan Regulador Comunal (PRC)	Mayores herramientas técnicas y de organización para incidir en las modificaciones del Instrumento (áreas de riesgo).	Se conoce lo que es un PRC y sus implicancias.	Se ha escuchado del PRC, pero no se conocen sus implicancias.	Desconocimiento.	Encuesta

VARIABLE	JUSTIFICACIÓN	VULNERABILIDAD BAJA -1	VULNERABILIDAD MEDIA -2	VULNERABILIDAD ALTA -3	FUENTE
Identidad, afecto y actitud con el lugar	Sentido de pertenencia y la posibilidad de trabajar en la resolución de problemas comunitarios.	Afecto e identificación con la localidad.	Afecto e identificación con el lugar, pero solo interesan las problemáticas que afectan directamente a la persona.	No hay afecto ni identificación con el lugar.	Encuesta
Disposición a cambiarse de vivienda frente a riesgo	Acciones como reubicación de asentamientos se pueden ver mermadas por personas que no quieren abandonar su locación actual.	Total disposición.	Disposición sujeta a diversas condiciones.	No existe disposición.	Encuesta

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE MARTÍNEZ Y ARÁNGUIZ (2016), FLORES Y SANHUEZA (2018), MARTÍNEZ ET AL. (2020), OCAMPO (2020), CANTILLAN Y HERRERA (2020), CARRARO ET AL. (2021) E INZUNZA (2021)

En relación con las variables recopiladas mediante encuesta, se estableció un universo muestral de encuestas a través del método de Sampieri et al. (2006), considerando un error estándar menor a 0,03 (3%) y un 90% de confiabilidad (Martínez & Aránguiz, 2016). Se tomó en consideración la muestra mayor de 18 años que habita permanentemente en manzanas bajo la cota 30 msnm.

Sobre la fórmula de Sampieri et al. (2006) para establecer el número de encuestas:

$$1. n' = \frac{s^2}{V^2}$$

$$2. n = \frac{n'}{1 + n'/N}$$

Donde:

- n: Tamaño de la muestra
- N: Población (residentes permanentes)
- se: Error estándar
- s²: Varianza de la muestra
- V²: Varianza de la población
- p: % de confiabilidad

En relación con ecuación 1:

$$s^2 = p(1 - p) = 0,9(1 - 0,9) = 0,09$$

$$V^2 = (se)^2 = (0,03)^2 = 0,0009$$

Reemplazando los valores en ecuación 1

$$n' = s^2 / V^2$$

$$n' = 0,09 / 0,0009 = 100$$

Luego en ecuación 2:

$$n = n' / (1 + n'/N)$$

$$n = 100 / (1 + 100/1980)$$

$$n = 95,1 \sim 95$$

En este sentido, CRET aplicó 95 encuestas en el área expuesta de San Sebastián. Para determinar el número de encuestas por manzana, se utilizó de referencia la fórmula establecida en Inzunza (2021).

$$f/h = n/N * N_h$$

Donde:

f/h = cociente entre n/N

N_h = número de personas por manzana.

Para evaluar la vulnerabilidad social de las manzanas censales del área expuesta, en primer lugar se hizo una sumatoria de todas las variables utilizadas (provenientes del censo y encuestas) según criterio de vulnerabilidad baja (1), media (2) y alta (3).

$$\sum_{i=1}^n a_i$$

Posteriormente, para establecer nivel de vulnerabilidad social, se desarrolló una normalización de la sumatoria total, por manzana, según media aritmética y desviación estándar del conjunto de datos. En este sentido, manzanas con un score-z menor a -0,5 tienen vulnerabilidad social baja; unidades con score-z entre -0,5 y 0,5 alcanzan vulnerabilidad social media; y finalmente, aquellas manzanas que resulten sobre 0,5 adquirieron vulnerabilidad social alta (Cutter et al., 2003).

Riesgo sísmico

Para la estimación de riesgo sísmico, se desarrolló álgebra de mapas entre la vulnerabilidad social y el daño físico potencial, según disposiciones de la Tabla 1. En esta línea, manzanas con valores de 1 a 2 tuvieron riesgo sísmico bajo; manzanas que resultaron en 3 o 4 alcanzaron riesgo sísmico medio, mientras que manzanas con valores de 6 o 9 establecieron riesgo sísmico alto.

Amenaza de tsunami

Se evaluó la amenaza de tsunami según parámetro hidrodinámico de altura de ola. Se utilizó la modelación de tsunami basada en un peor escenario para San Sebastián, desde la plataforma pública del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (Cartas de Inundación por Tsunami [CTSUS]-SHOA). Esta modelación utiliza simulación numérica COMCOT, integrando levantamiento batimétrico del fondo marino mediante sondaje, además de un modelo de elevación digital mediante puntos de control en terreno para topografía.

Para caracterizar la amenaza de tsunami, se utilizó el parámetro de metros de altura de ola predominante por manzana, según metros cuadrados. Al respecto, profundidades de inundación entre 0-1 m, establecen amenaza baja; profundidades de inundación entre 1-2 m indican amenaza media, en tanto que profundidades por sobre 2 m determinan amenaza alta (ajustado de Martínez & Aránguiz, 2016).

Riesgo concatenado

Para la estimación de riesgo concatenado, se configuró una matriz de 3 × 3 entre el riesgo sísmico y la amenaza de tsunami según Tabla 1. Sobre lo anterior, manzanas con valores de 1 o 2 tuvieron riesgo concatenado bajo; manzanas con cifras 3 o 4 significaron riesgo concatenado medio; manzanas con valores de 6 o 9 resultaron en riesgo concatenado alto, es decir, alta probabilidad de daños y pérdidas sociales y económicas producto de la ocurrencia de una amenaza sismo-tsunami en contexto de peor escenario.

Resultados

En San Sebastián, 70 manzanas censales resultaron estar localizadas bajo la cota 30 msnm.

Modelación del riesgo concatenado mediante CRET. Riesgo sísmico

Daño físico potencial

Relativo a la susceptibilidad sísmica, San Sebastián corresponde a la secuencia geológica Qe (secuencias sedimentarias del pleistoceno-holoceno), por lo que, según la Tabla 2, el área posee un tipo de suelo D-E con un Vs30 entre 0-400 y susceptibilidad sísmica alta, es decir, alta propensión del terreno a experimentar amplificación de movimiento sísmico. Las 70 manzanas poseen susceptibilidad sísmica alta (Figura 3A).

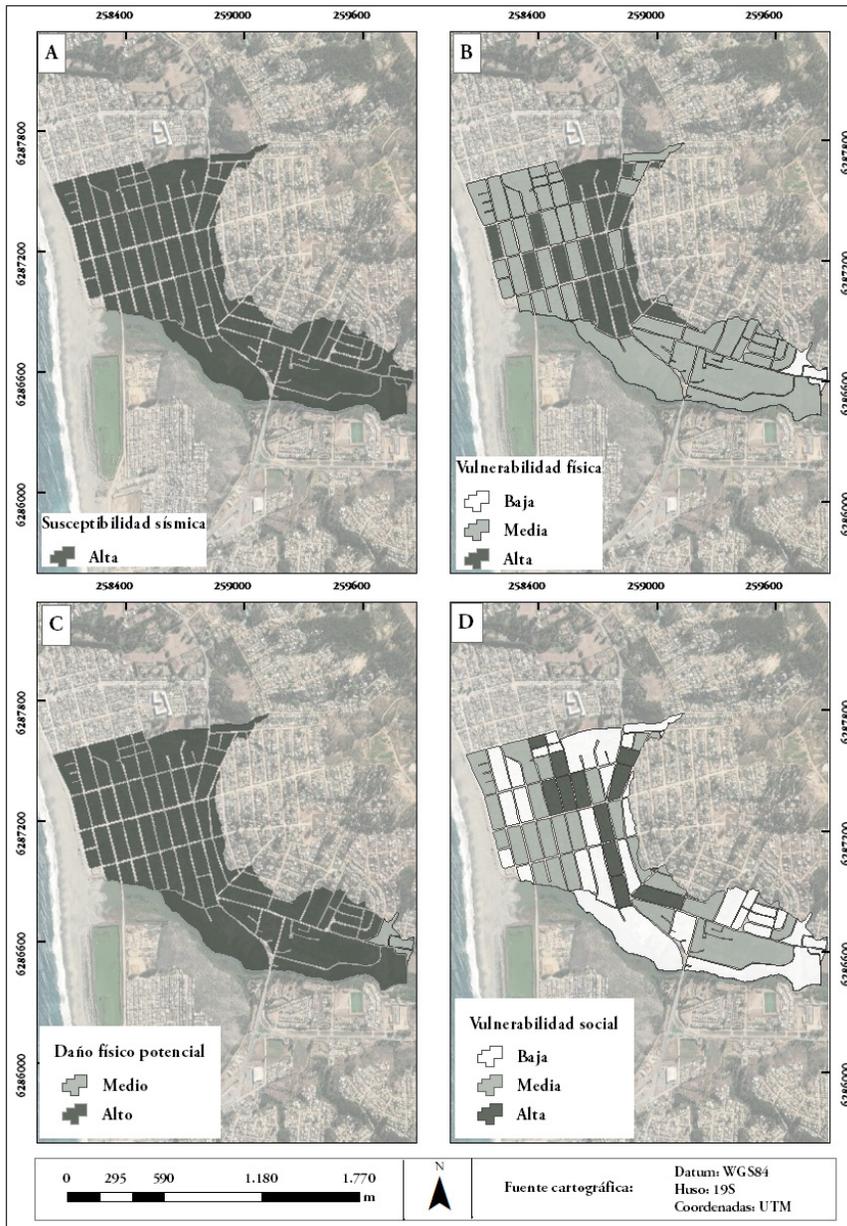
En torno a la vulnerabilidad estructural de las edificaciones, factor determinado, en primer lugar, por su año de origen, 22 de 70 de las manzanas (31,4%) fueron construidas antes del año 1972, por lo que no poseen normas de construcción anti-sísmicas. De igual manera, al analizar la materialidad predominante por manzana, 6 manzanas resultaron en albañilería (8,6%) y 61 en madera (87,1%); asimismo, 3 manzanas no tienen construcciones y corresponden a áreas agrícolas (4,3%). A partir de la integración de la materialidad y el año de construcción por manzana, según lo dispuesto en la Tabla 3, 3 manzanas poseen vulnerabilidad estructural baja ante sismos (4,3%), 45 alcanzaron vulnerabilidad estructural media (64,3%) y 22 manzanas obtuvieron vulnerabilidad estructural alta (31,4%) (Figura 3B).

Finalmente, para la estimación del daño potencial ante sismos, realizada a través de la integración de los niveles de susceptibilidad sísmica y vulnerabilidad estructural, 67 manzanas resultaron en daño físico potencial alto (95,7%), es decir, alta probabilidad de daños estructurales en las construcciones producto de un sismo (Figura 3C). En tanto, 3 manzanas obtuvieron daño potencial medio (4,3%).

Vulnerabilidad social

De las manzanas estudiadas, 33 resultaron en vulnerabilidad social baja (47,1%), 25 fueron calificadas como de vulnerabilidad social media (35,7%) y 12 alcanzaron vulnerabilidad social alta (17,2%), es decir, alta susceptibilidad al daño por parte de la población debido a sus características socioeconómicas, educativas, organizacionales, gubernamentales y culturales (Figura 3D). En las manzanas con vulnerabilidad social alta se presentaron características tales como ingresos promedio por hogar menores a \$200.000; actividad laboral ligada al turismo o las personas son pensionadas o cesantes; alto impacto de la pandemia (Covid-19) en el nivel socioeconómico del hogar; escasas nociones sobre cómo actuar ante un sismo que no permite mantenerse en pie; no se participa en organizaciones comunitarias, además del desconocimiento de medidas para la reducción del riesgo y sobre lo que es un Plan Regulador Comunal. Cabe destacar que, en las manzanas sin habitantes, se asumió vulnerabilidad social baja.

FIGURA 3 | Zonificación de daño físico potencial y vulnerabilidad social



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Riesgo sísmico

A partir de la integración de los tres niveles de daño físico potencial y vulnerabilidad social, 3 manzanas resultaron en riesgo sísmico bajo (4,3%), 30 manzanas obtuvieron riesgo sísmico medio (42,9%) y 37 manzanas alcanzaron riesgo sísmico alto (52,8%) (Figura 4A); es decir, existe alta probabilidad de daños y pérdidas en caso de sismo, en función de características sociales y físico-estructurales de las construcciones dispuestas en las manzanas.

Modelación del riesgo concatenado mediante CRET. Amenaza de tsunami

Según la modelación del SHOA en un peor escenario, 16 manzanas obtuvieron amenaza de tsunami baja (profundidad de inundación bajo 1 metro), 3 manzanas resultaron en amenaza media (profundidad de inundación entre 1 y 2 metros) y 24 manzanas censales alcanzaron amenaza alta (profundidad de inundación sobre 2 metros) (Figura 4B).

Modelación del riesgo concatenado mediante CRET. Riesgo concatenado sismo-tsunami

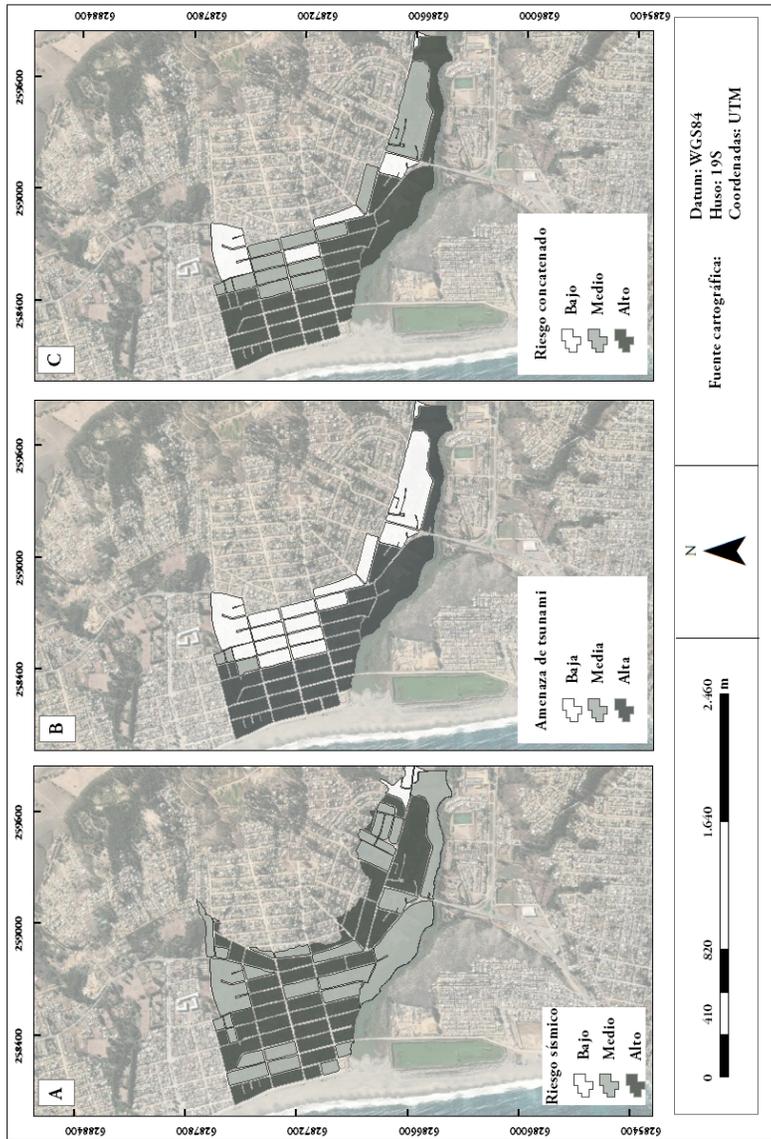
Se integró el riesgo sísmico con la amenaza de tsunami para identificar daños y pérdidas producto del tsunami una vez ocurrido el sismo, utilizando para ello los tres niveles de riesgo sísmico y amenaza de tsunami.

De las 70 manzanas censales bajo cota 30 msnm, 43 de ellas están efectivamente expuestas simultáneamente a la amenaza sismo-tsunami (61,4%). Sobre lo anterior, de las 43 manzanas censales expuestas a ambas amenazas, 5 poseen riesgo concatenado bajo (11,6%), es decir, baja probabilidad de pérdidas y daños producto de la ocurrencia del tsunami, una vez ocurrido un sismo. Según datos censales, las manzanas con riesgo concatenado bajo agrupan a 79 personas (2,8% de los habitantes de la localidad).

Por otro lado, 13 manzanas poseen riesgo concatenado medio (30,3%), abarcando a 479 personas (17,1% de los habitantes de San Sebastián). Finalmente, 25 manzanas poseen riesgo concatenado alto (58,1%). Ello establece alta probabilidad de pérdidas y daños sociales y económicos producto de un tsunami, una vez ocurrido un sismo con características similares al evento de 1730, debido a los efectos en cascada entre ambas amenazas (Figura 4C), constituyendo un peligro severo para personas, infraestructura y construcciones. Según datos del censo, las manzanas con riesgo concatenado alto integran a 657 personas (23,5% de la población de la localidad).

En tal sentido, de las 2.792 personas residentes en San Sebastián, 1.215 se encuentran bajo algún grado de riesgo frente a la amenaza sismo-tsunami (43,5% de la población que habita permanentemente en la zona).

FIGURA 4 | Riesgo sísmico, amenaza de tsunami y riesgo concatenado en San Sebastián



FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

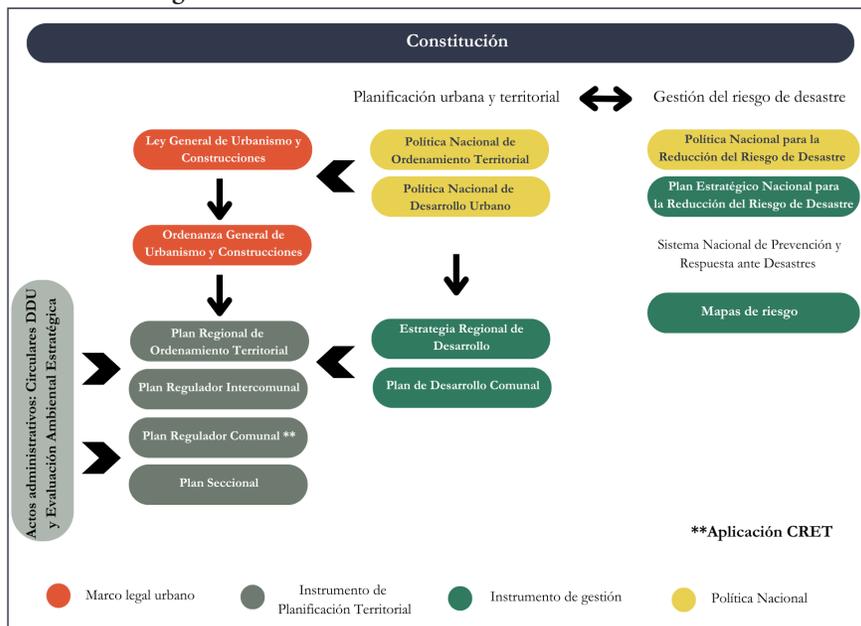
Oportunidad de aplicación de CRET en Chile

Se consideraron dos parámetros para evaluar la validez de CRET en San Sebastián, los cuales aluden a la presencia de los tres niveles de riesgo posibles y, además, que el nivel de riesgo que en menor medida se presente corresponda al menos al 10% de manzanas efectivamente expuestas a sismo-tsunami (Raykov & Marcoulides, 2008).

Según la figura 4C, se presentan los tres niveles de riesgo. Además, el riesgo concatenado bajo (nivel menos presente) corresponde a 5 de 43 manzanas expuestas (11,6%), por lo que CRET es una metodología aplicable y pertinente para la localidad de San Sebastián y se espera que sirva como modelo para evaluar riesgo concatenado e incorporar áreas de riesgo en los IPT de otras localidades y municipios expuestos a la amenaza sismo-tsunami. Ejemplos de ello son las comunas costeras de la Región de Valparaíso, que necesitan incorporar áreas de riesgo en sus instrumentos y que, además, posean datos geológicos para caracterizar amenaza sísmica y modelación CITSU-SHOA de tsunamis.

Sobre lo anterior, y considerando el análisis de figuras normativas e indicativas territoriales y de reducción del riesgo con alcances de gestión prospectiva en Chile (Rinaldi & Bergamini, 2020), se encontraron diversas instancias que se insertan en esta dirección; entre ellas, marco legal, actos administrativos, instrumentos de gestión, instrumentos de planificación territorial y políticas nacionales, cuyos alcances y relaciones se resumen en la Figura 5.

FIGURA 5 | Marco chileno de planificación urbana-territorial y reducción del riesgo



(*) DDU: DIVISIÓN DE DESARROLLO URBANO.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE RINALDI Y BERGAMINI (2020) Y VICUÑA Y SCHUSTER (2021)

Desde las instancias identificadas en la Figura 5, se observó cómo actualmente existen criterios para incorporar CRET en los IPT, en donde el instrumento de aplicación del método corresponde al Plan Regulador Comunal (PRC), en este caso el del municipio Cartagena, el cual se actualizará para incorporar áreas de riesgo. Así, para que CRET sea aplicable como tal en el PRC, es necesario, en primera instancia, actualizar el artículo 2.1.17 de la OGUC mediante la incorporación del enfoque de multiamenaza (reconocimiento de que en un área pueden actuar dos o más amenazas de manera simultánea), la definición de riesgo (amenaza * vulnerabilidad) y su gradualidad (niveles de riesgo), además del establecimiento de metodologías estandarizadas para los estudios de riesgo, en donde CRET puede ser guía para evaluar riesgo en áreas expuestas a sismo-tsunami.

Lo anterior es factible gracias a diversas disposiciones del marco nacional de gestión del riesgo y planificación urbana-territorial. Respecto a gestión del riesgo, se destaca el Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030, el cual expone que se deben desarrollar escenarios de riesgo bajo multiamenaza e implementar evaluación de riesgo como tal en los IPT. Además, tras la promulgación del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), que integrará modelos de gestión prospectiva en la reducción del riesgo, aparecen nuevos instrumentos, como los mapas de riesgo, que relacionarán amenaza, elementos expuestos y vulnerabilidad. No obstante, aunque tales instrumentos serán insumo a los Planes para la Gestión de Riesgo de Desastres correspondientes al nivel regional, provincial y comunal, no son vinculantes, por ahora, en los IPT.

Sobre planificación urbana y territorial, sobresalen los lineamientos de la Política Nacional de Ordenamiento Territorial, los cuales señalan que se deben identificar zonas de alto riesgo para ser consideradas en los IPT. En la Tabla 5 se resume la oportunidad de aplicación de CRET en el PRC de Cartagena mediante el marco de gestión del riesgo de desastre, orientaciones en planificación urbana y territorial, marco legal urbano y territorial, Instrumentos de Planificación Territorial y otros procedimientos, los cuales poseen diversas disposiciones para integrar gestión prospectiva del riesgo, actualizar el artículo 2.1.17 de la OGUC e incorporar áreas de riesgo en el PRC respectivo.

TABLA 5 | Oportunidad de aplicación de CRET dentro del marco de planificación urbana territorial y reducción del riesgo

ÁMBITO	FIGURA	INDICACIÓN/OPORTUNIDAD DE APLICACIÓN PARA CRET
Constitución	Constitución Política de Chile	Norma fundamental del ordenamiento jurídico. Se pueden incorporar reformas para integrar lineamientos de reducción del riesgo.
Gestión del riesgo de desastre	Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastre 2020-2030 (*)	Instrumento orienta hacia la gestión prospectiva en la reducción del riesgo. Establece que se debe fortalecer la reducción del riesgo en los IPT.
	Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030 (*)	Instrumento para materializar Política de Reducción del Riesgo. Expone que se deben desarrollar escenarios de riesgo bajo multiamenaza, renovar el marco normativo y reglamentario para reducción del riesgo e implementar evaluación de riesgo como tal en los IPT.
	Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED)	Con entrada en vigencia de SINAPRED, aparecen figuras como los mapas de riesgo, que corresponden a instrumentos que relacionan amenaza y vulnerabilidad (no vinculante en IPT).
Orientaciones en planificación urbana y territorial	Política Nacional de Ordenamiento Territorial	Orienta políticas para normativas e Instrumentos Territoriales. Señala que se deben identificar zonas de alto riesgo para ser consideradas en los IPT.
	Política Nacional de Desarrollo Urbano	Fija lineamientos para el desarrollo urbano. Establece que se deben fomentar estudio sobre riesgos para ser integrados en los IPT.
	Estrategia Regional de Desarrollo (Valparaíso)	Instrumento de planificación para el Gobierno Regional. Indica que se deben disminuir los niveles de riesgo para la seguridad de los asentamientos.
	Plan de Desarrollo Comunal de Cartagena	Instrumento de Planificación para el Municipio. Resalta que se debe renovar el IPT de la comuna.
Marco legal urbano y territorial	Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC)	La ley define responsabilidades, atribuciones y normas. El artículo 60 establece la facultad de los IPT para señalar terrenos no edificables.
	Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)	Corresponde al reglamento de la LGUC. La principal oportunidad es la actualización del artículo 2.1.17, mediante la incorporación de amenaza sísmica, enfoque de multiamenaza, definición de riesgo y su gradualidad, además del establecimiento de una metodología estandarizada en los estudios de riesgo.

ÁMBITO	FIGURA	INDICACIÓN/OPORTUNIDAD DE APLICACIÓN PARA CRET
Instrumentos de Planificación Territorial	Plan Regional de Ordenamiento Territorial (PROT Valparaíso)	Instrumento indicativo con macrozonificación regional. Señala que se debe integrar la gestión del riesgo en los IPT.
	Plan Regulador Intercomunal (PRI Valparaíso – Satélite Borde Costero sur)	Instrumento normativo para áreas rurales y urbanas de diversas comunas. La oportunidad es su actualización para incorporar áreas de riesgo.
	Plan Regulador Comunal (PRC Cartagena)	Instrumento normativo para áreas urbanas de la comuna (no puede contradecir PRI). La oportunidad es su actualización para incorporar áreas de riesgo.
	Plan Seccional	Normativa detallada del PRC sobre algún sector del municipio. La oportunidad es la posibilidad de incorporar áreas de riesgo.
Otros procedimientos	Circulares de la División de Desarrollo Urbano (DDU)	Instruyen en lo relativo a la aplicación de la OGUC e IPT. Hay antecedentes sobre la integración de nuevas amenazas a las áreas de riesgo de la OGUC. Además, pueden operar como instructivos para incorporación de procedimientos en los IPT.
	Evaluación Ambiental Estratégica (EAE)	Establece criterios ambientales para actualizar los IPT. Expone que el riesgo es un criterio de sustentabilidad para promulgar/actualizar los IPT.

(*) SE DEBEN ACTUALIZAR TRAS LA ENTRADA EN VIGOR DE LA LEY 21364 (SISTEMA NACIONAL DE PREVENCIÓN Y RESPUESTA ANTE DESASTRES).

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Discusión

¿Qué implica zonificar áreas de riesgo bajo el enfoque de gestión prospectiva del riesgo?

La gestión prospectiva del riesgo en la planificación territorial debe apuntar al desarrollo de un sistema urbano con resiliencia y adaptabilidad y, con ello, capacidad de actuación y recuperación ante amenazas naturales (Rinaldi & Bergamini, 2020; Rodríguez, 2017). Por ello es clave la inclusión de escenarios de riesgo para identificar áreas y poblaciones mayormente afectadas por un eventual desastre, posibilitando así el desarrollo de medidas y acciones destinadas a reducir el riesgo actual y futuro (Narváez et al., 2009; Rinaldi & Bergamini, 2020).

En el marco señalado se evidencia la importancia de CRET, metodología que permite una aproximación integral ante un escenario de riesgo concatenado sismo-tsunami, pues considera la caracterización de la amenaza sísmica y de tsunami, además de elementos de vulnerabilidad física y social. Sobre tal base determina tres niveles de riesgo y atiende, de paso, la crítica que se hace a los estudios de riesgo que integran solo una amenaza o que no vislumbran la interacción de la(s) amenaza(s) con el medio social y construido expuesto (Barría et al., 2019; Imamura et al., 2019).

CRET estableció tres niveles de riesgo concatenado sismo-tsunami para San Sebastián, lo cual debe considerarse como referencia e insumo a las zonificaciones

y disposiciones de las áreas de riesgo de los IPT, particularmente de los PRC, con miras a evitar desastres sismo-tsunami tales como el 27F de 2010 en Chile y Japón en 2011. En este aspecto y desde una perspectiva de planificación territorial con enfoque de gestión prospectiva del riesgo, tales zonificaciones de áreas de riesgo, y sus disposiciones, deben propender a la adaptabilidad de las comunidades, construcciones e infraestructuras expuestas, pero limitar las que se lleven a cabo a futuro en los terrenos expuestos, según reglas que atiendan el nivel de riesgo concatenado presente. Esto, pues no se podría pensar en una relocalización colectiva de comunidades actualmente expuestas debido al alto nivel de urbanización del área (Martínez et al., 2020), a lo que se suma que el 61,1% de los encuestados no se cambiaría de vivienda a zona segura, y al valor de mercado que el Estado debería asumir para apropiar equipamientos e infraestructura (Vicuña & León, 2022).

En tal sentido, y tomando de referencia las sugerencias de la Comisión Nacional de Desarrollo Urbano (2019), en las áreas de riesgo alto no se debiese aumentar la densidad urbana ni permitir la construcción de nuevas viviendas ni de infraestructura crítica, mientras que en las áreas de riesgo medio se debiese considerar un grado de restricción menor. Relativo a las áreas de riesgo bajo, el permiso de edificación de cualquier uso o destino se debería acompañar de medidas que permitan subsanar el riesgo, tal cual lo dispone actualmente el artículo 2.1.17 de la OGUC.

El primer desafío para avanzar a una planificación territorial adaptativa ante riesgos naturales, es el desarrollo de un marco regulatorio que ofrezca a los actores públicos y privados la capacidad de evaluar y gestionar la incertidumbre futura ante el riesgo (Rinaldi & Bergamini, 2020). De acuerdo con Vicuña y Schuster (2021), aunque en Chile se ha avanzado en el desarrollo de un marco conceptual e institucional para la reducción del riesgo, dicho marco todavía no se integra sistemáticamente en la planificación territorial e, incluso, se da una interacción (no necesariamente fluida) entre los diferentes cuerpos indicativos y normativos, sin la necesaria orientación de un instrumento que otorgue coherencia al conjunto de decisiones territoriales (Andrade et al., 2008).

Sobre lo anterior, la reciente promulgación de la Política Nacional de Ordenamiento Territorial y el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), se considera una oportunidad para la integración y concordancia de normas e indicaciones relativas a gestión del riesgo mediante la planificación territorial, lo cual complementa las indicaciones de la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030, que apunta, justamente, a renovar el marco normativo para la gestión territorial vinculante del riesgo.

Entre los desafíos normativos para una planificación territorial adaptativa está el considerar una evaluación del riesgo como tal en las áreas de riesgo de los IPT, incluso con perspectiva de multirriesgo (Barría et al., 2019), por lo cual es necesario que los nuevos instrumentos de gestión SINAPRED, particularmente los mapas de riesgo, sean vinculantes en planificación territorial. Con miras a lo anterior, CRET aporta con lineamientos orientados a actualizar la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), ser una referencia metodológica para evaluar riesgo sismo-tsunami en los IPT e integrar gradualidad del riesgo (dicha normativa no establece niveles de riesgo ni la prohibición de construir en casos justificados).

Finalmente, y para avanzar hacia un sistema de reducción del riesgo integral e integrado desde los IPT, en línea con la adaptabilidad del sistema urbano, las disposiciones para regular las construcciones y densidades según nivel de riesgo se deben complementar, al menos, con los siguientes ítems:

- a. Implementar medidas estructurales para reducir la vulnerabilidad física de edificaciones e infraestructura crítica expuestas actualmente, principalmente en áreas de riesgo alto, lo cual se debe acompañar de incentivos y alternativas de opciones accesibles (Igualt, 2017).
- b. Definir criterios para la ubicación y funcionamiento de la infraestructura crítica a partir de niveles de riesgo (Fekete et al., 2017), lo cual debería considerarse en la OGUC.
- c. Incorporar las funciones o servicios ecosistémicos de los sistemas naturales como mitigadores ante amenazas naturales y de adaptación al cambio climático, en línea con lo dispuesto en la Política Nacional de Ordenamiento Territorial. En San Sebastián, se debe considerar la presencia de dunas, humedales, esteros, playas.
- d. Incorporar estudios y planes de evacuación dentro del marco normativo de planificación territorial, incluida evacuación vertical. Se debe propender a que la población evacúe rápida y adecuadamente a zonas seguras, lo cual debe considerarse en los PRC mediante disposiciones urbanísticas. En el caso de San Sebastián, se debe propender a la pavimentación de calles para agilizar la evacuación, la relocalización de ferias libres ubicadas en vía de evacuación y el trabajo con centros educacionales ubicados en zonas expuestas.
- e. Se debe considerar tempranamente la fase de recuperación, concibiendo medidas y acciones que apunten a su sostenibilidad. Se debe identificar y generar una red sistémica de espacios abiertos, los cuales, en contexto de respuesta a la emergencia o desastre, se convierten en una “segunda ciudad” debido a la multiplicidad de funciones que albergan en el espacio-tiempo; entre ellas, hábitat temporal, refugio, conmemoración, comercio y ayuda humanitaria. Entre esta red de espacios abiertos se ubican espacios públicos (plazas, parques y calles), estacionamientos, sitios eriazos y zonas no urbanizadas, incluido espacio natural (Rodríguez, 2017). Además, se debe propender a la identificación y definición de estándares para albergues y centros de acopio comunitarios.
- f. Fortalecer instancias de capacitación, educación y difusión de estudios hacia la comunidad, con el fin de generar participación ciudadana y consolidar la organización comunitaria en torno a temáticas relacionadas con la reducción del riesgo y planificación territorial para el desarrollo local, por lo que se debe hacer entrega de información en diferentes espacios, formatos y lenguajes. Con esto, la comunidad local se puede apropiar del riesgo y comprenderlo (Donovan et al., 2018).

- g. Se debe reducir la vulnerabilidad social ante el riesgo mediante políticas y planes de desarrollo, instrumentos y medidas que apunten, entre otros, a aspectos de salud, educación, ingresos, alimentación, empleo y cultura, acorde a preferencias y tradiciones de las personas y comunidades (Vega-Centeno, 2004). Para ello, CRET aporta con el diagnóstico y mapeo de las poblaciones más vulnerables y asentadas en áreas de riesgo alto, en las cuales se puede focalizar el futuro gasto público (Fainstein, 2015).

Discusión metodológica y limitaciones del estudio

La oportunidad de aplicación de CRET es que los organismos encargados de diseñar y desarrollar instrumentos de planificación territorial podrán incorporar áreas de riesgo concatenado a partir de información disponible en bases de datos públicas e, idealmente, a través de encuestas a la población expuesta, lo cual disminuiría tiempo y recursos para incorporar estas zonificaciones en dichos instrumentos. En este sentido, CRET utiliza datos accesibles y se puede ir afinando en los siguientes aspectos:

- a. Para la estimación del riesgo sísmico (daño potencial * vulnerabilidad social), compuesto en primera instancia por el daño físico potencial, se debería avanzar hacia caracterizaciones geológicas o de tipos de suelo en mayor detalle para estimar la susceptibilidad sísmica. Como se observó en la Figura 3A, debido a la escala del *shapefile* de unidades geológicas, San Sebastián en su conjunto resultó con susceptibilidad alta, lo que se puede considerar una limitación.
- b. Asimismo, para daño físico potencial de las construcciones, en caso de contar con recursos técnicos y económicos, se recomienda que sea estimado mediante software como HAZUS-MH u openquake, los cuales poseen indicadores tales como metros cuadrados de daño a nivel de predio o manzana según diversos escenarios sísmicos (Derakhshan et al., 2020), constituyendo caracterizaciones de daño más integrales.
- c. Por otro lado, ligado a la caracterización de la vulnerabilidad social, se establece una limitación al incorporar datos estadísticos del Censo 2017, principalmente por su carácter abreviado y el tiempo transcurrido entre su aplicación y el desarrollo de este estudio, donde ocurrieron cambios en el volumen de población, edad, género y migración, etc., que no están reflejados en CRET. Además, durante la pandemia hubo un aumento acelerado de las ocupaciones irregulares por las crisis económicas y restricciones de movilidad (Zenteno et al., 2022), por lo que futuras aplicaciones del método deben identificar su existencia e influencia en la vulnerabilidad.
- d. De igual manera, dentro del componente vulnerabilidad social, es una limitación no considerar el factor turístico (mayor exposición a amenazas, principalmente en época estival), por lo que CRET debe avanzar hacia la integración del número de turistas y, en este sentido, el trabajo con las empresas de telefonía que poseen datos georreferenciados de este tipo puede ser crucial (León et al., 2021).

- e. Respecto al método de evaluación de la vulnerabilidad social, se optó por la ponderación uniforme de todas las variables. Sin embargo, se sugiere examinar el método SoVI de análisis estadístico de componentes principales (Cutter et al., 2003) y/o el juicio de expertos para ponderación diferenciada a las variables (Álvarez et al., 2019). Aún más, para integrar tópicos como la memoria territorial y saberes locales, se recomienda desarrollar cartografías participativas que apoyen al análisis cuantitativo de los resultados (Visconti et al., 2021).
- f. En el caso de la amenaza de tsunami, se debe avanzar hacia la integración de modelos probabilísticos, los cuales incorporan incertidumbres propias de eventos como los tsunamis (Becerra et al., 2020), por lo que es un desafío que el SHOA actualice sus modelaciones CITSU a este tipo de enfoque. Incluso se podría incorporar daño estructural ante sismos (Cortez et al., 2022).
- g. En términos generales del método, CRET debería operar sin problemas en municipios con población expuesta de hasta 5.000 habitantes, lo cual está dado por la fórmula de marco muestral para encuestas (Sampieri et al., 2006) y los criterios de error estándar (3%) y confiabilidad propuestos (90%). Con un número mayor, el muestreo se distorsiona (no hay grandes diferencias de muestreo, por ejemplo, con un universo de 5.000 y 20.000 personas expuestas). La solución a esto es cambiar los criterios estadísticos de error estándar o confiabilidad, o bien, utilizar otra fórmula.
- h. En cuanto a los resultados obtenidos en San Sebastián, al análisis de manzanas en riesgo concatenado se redujo de 70 a 43 manzanas censales, es decir, un 38,6%. Por esto, lo óptimo es acotar el análisis de riesgo concatenado exclusivamente a las manzanas afectadas por la modelación de tsunami, en vez de considerar la cota 30 msnm, lo cual reduciría costos económicos y operacionales para su aplicación.
- i. Por último, se invita a incorporar nuevas amenazas dentro del riesgo concatenado sismo-tsunami (licuefacción, remociones en masa, etc.) e incluso la interacción con Natech¹ (Lestari et al., 2021) –entre ellos, incendios, accidentes químicos, interrupción de suministros, etc.–, lo cual permitiría aproximarse a escenarios de desastre más realistas como insumo a la planificación territorial. De igual manera, se sugiere evaluar la aplicabilidad de CRET en municipios costeros de otras regiones de Chile expuestas a sismo-tsunami y la posibilidad de emplear el método en Planes Reguladores Intercomunales (PRI) para el caso de zonas rurales (PRC solo abarca área urbana) y en Planes Seccionales.

1 Los riesgos Natech –del acrónimo en inglés *Natural hazard-triggered technological accidents*– son eventos de origen natural que desencadenan accidentes tecnológicos.

Conclusiones

Ante la ausencia de metodologías para evaluar riesgo concatenado sismo-tsunami en Chile, CRET sienta un precedente al incorporar a más de una amenaza en la evaluación del riesgo y por considerar el relato de desastre en cascada, en el cual primero ocurre un sismo y posteriormente un tsunami, estimando, con ello, los impactos del tsunami, una vez ocurrido el sismo. En este sentido, además, CRET se presenta como oportunidad de aplicación para zonificar áreas de riesgo en los IPT, considerando que, actualmente, no existen metodologías estandarizadas para incorporar riesgo como tal en ellos y, además, solo se considera el componente amenaza, lo cual subestima áreas-niveles de riesgo y limita la utilidad de las disposiciones urbanísticas para mitigar los impactos de las amenazas.

CRET, a través de SIG y mediante datos públicos y encuestas, fue aplicado como piloto en la localidad de San Sebastián, municipio de Cartagena, estableciendo que 43 manzanas censales están expuestas a riesgo concatenado ante un escenario similar al de 1730, integrando a 1.215 personas. De las manzanas afectadas, 5 tuvieron riesgo concatenado bajo (11,6%), 13 resultaron en riesgo concatenado medio (30,3%) y 25 alcanzaron riesgo concatenado alto (58,1%), lo que establece peligro severo para personas y construcciones.

Mediante el establecimiento de tres niveles de riesgo, y en línea con una gestión prospectiva del riesgo en la planificación territorial, se generaron disposiciones para la adaptabilidad de los elementos expuestos actualmente, se establecieron exigencias para nuevos usos de suelo (según nivel de riesgo) y se constituyó un mapeo base para el desarrollo de un plan integral de reducción del riesgo, que consideró, entre otros, planes de evacuación, localización de infraestructura crítica y protección de ecosistemas costeros.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo al Proyecto 1523A0009, FONDAF 2023, así como al Proyecto ANID-FONDECYT 1241922 (Factores de cambio y geomorfología evolutiva en la costa de Chile: bases científicas para la resiliencia y gestión integrada de la costa).

Referencias bibliográficas

- Aguirre, P., Vásquez, J., De la Llera, J., González, J. & González, G. (2018). Earthquake damage assessment for deterministic scenarios in Iquique, Chile. *Natural Hazards*, 92, 1433–1461. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3258-3>
- Álvarez, J., Aristizábal, P., Torres, D. & Jurado, V. (2019). Validación de un instrumento para medir la vulnerabilidad en relación con la capacidad de respuesta de la comunidad ante desastres. *Revista Geográfica de América Central*, (62), 278-301. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.62-1.11>

- Andrade, B., Arenas, F. & Guijón, R. (2008). Revisión crítica del marco institucional y legal chileno de ordenamiento territorial: el caso de la zona costera. *Revista de Geografía Norte Grande*, (41), 23-48. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022008000300002>
- Aránguiz, R., Martínez, C., Rojas, O., Hoffmann, C. & López, P. (2020). The generation of new tsunami risk areas due to an intentionally biased reconstruction process: Case study of Llico after the 2010 Chile tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101727. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101727>
- Barría, P., Cruzat, M. L., Cienfuegos, R., Gironás, J., Escauriza, C., Bonilla, C., Moris, R., Ledezma, C., Guerra, M., Rodríguez, R. & Torres, A. (2019). From multi-risk evaluation to resilience planning: The case of Central Chilean coastal cities. *Water*, 11(3), 572. <https://doi.org/10.3390/w11030572>
- Becerra, I., Aránguiz, R., González, J. & Benavente, R. (2020). An improvement of tsunami hazard analysis in Central Chile based on stochastic rupture scenarios. *Coastal Engineering Journal*, 62(4), 473-488. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1812943>
- Bronfman, N., Cisternas, P., López-Vázquez, E. & Cifuentes, L. (2016). Trust and risk perception of natural hazards: implications for risk preparedness in Chile. *Natural Hazards*, 81(1), 307-327. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2080-4>
- Cantillan, R. & Herrera, J. (2020). Centralidad de actores y bloques en las redes organizativas de movilización en el conflicto por el Plan Regulador Comunal de Peñalolén el año 2011. *Revista EURE – Revista de Estudios Urbano Regionales*, 46(138), 25-46. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612020000200025>
- Carena, S. (2011). Subducting-plate Topography and Nucleation of Great and Giant Earthquakes along the South American Trench. *Seismological Research Letters*, 82(5), 629-637. <https://doi.org/10.1785/gssrl.82.5.629>
- Carraro, V., Visconti, C. & Inzunza, S. (2021). Neoliberal urbanism and disaster vulnerability on the Chilean central coast. *Geoforum*, 121, 83-92. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.02.023>
- Carvajal, M., Cisternas, M. & Catalán, P. (2017). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile. *Journal of Geophysical Research*, 122(5), 3648-3660. <https://doi.org/10.1002/2017JB014063>
- Comisión Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU). (2019). *Propuestas para el mejoramiento de las condiciones de resiliencia de las ciudades chilenas*. <https://cndu.gob.cl/download/propuestas-para-el-mejoramiento-de-lascondiciones-de-resiliencia-de-las-ciudades-chilenas/>
- Cortez, C., Jünemann, R., Fernández, C., Urrutia, A., Crempiem, J. & Cienfuegos, R. (2022). Performance of an RC building under seismic and tsunami actions in sequence via nonlinear dynamic analysis including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 272, 114942. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114942>
- Crespo, M., Benjumea, B., Moratalla, J., Lacoma, L., Macau, A., González, Á., Gutiérrez, F. & Stafford, P. (2022). A proxy-based model for estimating VS30 in the Iberian Peninsula. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107165. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107165>

- Curt, C. (2021). Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis. *The Science of the Total Environment*, 763, 142951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951>
- Cutter, S., Boruff, B. & Shirley, W. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261. <https://www.jstor.org/stable/42955868>
- Depietri, Y. (2019). The social-ecological dimension of vulnerability and risk to natural hazards. *Sustainability Science*, 15(2), 587–604. <https://doi.org/10.1007/s11625-019-00710-y>
- Derakhshan, S., Hodgson, M. & Cutter, S. (2020). Vulnerability of populations exposed to seismic risk in the state of Oklahoma. *Applied Geography*, 124, 102295. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102295>
- Donovan, A., Suppasri, A., Kuri, M. & Torayashiki, T. (2018). The complex consequences of volcanic warnings: Trust, risk perception and experiences of businesses near Mount Zao following the 2015 unrest period. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 27, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.09.023>
- Eckert, S., Jelinek, R., Zeug, G. & Krausmann, E. (2012). Remote sensing-based assessment of tsunami vulnerability and risk in Alexandria, Egypt. *Applied Geography*, 32(2), 714–723. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.08.003>
- Fainstein, S. (2015). Resilience and justice. *International Journal of Urban and Regional Research*, 39(1), 157–167. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12186>
- Fekete, A., Tzavella, K. & Baumhauer, R. (2017). Spatial exposure aspect contributing to vulnerability and resilience assessments of urban critical infrastructure in a flood and blackout context. *Natural Hazards*, 86, 151–176. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2720-3>
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F. & Dahe, Q. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>
- Fleming, K., Zschau, J., Gasparini, P., Modaresi, H. & Consortium, M. (2011). *New Multi-Hazard and Multi-risk Assessment Methods for Europe (MATRIX)*. American Geophysical Union. <https://cordis.europa.eu/project/id/265138/es>
- Flores, P. & Sanhueza, R. (2018). Resiliencia comunitaria frente a los desastres naturales: caleta Tumbes, región del Biobío, Chile. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(1), 131–145. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n1.59904>
- Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T. & Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
- Greiving, S., Schödl, L., Gaudry, K., Quintana, I., Prado, B., Fleischhauer, M., Margoth, M., Guerra, J. & Tobar, J. (2021). Multi-risk assessment and management – A comparative study of the current state of affairs in Chile and Ecuador. *Sustainability*, 13(3), 1366. <https://doi.org/10.3390/su13031366>
- Igualt, F. (2017). Evaluación de vulnerabilidad física y adaptabilidad post-tsunami en Concón, zona central de Chile. *Revista AUS*, (22), 53–58. <https://doi.org/10.4206/aus.2017.n22-09>

- Imamura, F., Boret, S. P., Suppasri, A. & Muhari, A. (2019). Recent occurrences of serious tsunami damage and the future challenges of tsunami disaster risk reduction. *Progress in Disaster Science*, 1, 100009. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100009>
- Inzunza, S. (2021). Resiliencia comunitaria ante riesgo de tsunami en la costa neoliberal: El caso de la comuna de El Quisco, región de Valparaíso, Chile. *Geográfica del Sur*, 10(1), 52-72. <https://doi.org/10.29393/GS10-3RCSI10003>
- Kappes, M., Keiler, M., Von Elverfeldt, K. & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 64(2), 1925-1958. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>
- Kondo, T. & Lizarralde, G. (2021). Maladaptation, fragmentation, and other secondary effects of centralized post-disaster urban planning: The case of the 2011 “cascading” disaster in Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102219. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102219>
- Kumbier, K., Carvalho, R. C., Vafeidis, A. T. & Woodroffe, C. D. (2018). Investigating compound flooding in an estuary using hydrodynamic modelling: a case study from the Shoalhaven River, Australia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(2), 463–477. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-463-2018>
- Lara, A., Bucci, F., Palma, C., Munizaga, J. & Montre-Águila, V. (2021). Development, urban planning and political decisions. A triad that built territories at risk. *Natural Hazards*, 109(2), 1935-1957. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04904-5>
- Lavell, A. & Lavell, C. (2020). *El COVID-19: Relaciones con el riesgo de desastres, su concepto y gestión*. FLACSCO. https://www.desenredando.org/public/2020/Lavell_2020-05_Covid-19_y_Desastre_v3.4.pdf
- León, J., Mas, E., Catalán, P. A., Moya, L., Gubler, A., Koshimura, S. & Cienfuegos, R. (2021). Development of calibrated tsunami evacuation models through real-world collected data: The case study of Coquimbo-La Serena, Chile. *Earth and Environmental Science*, 630(1), 12005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/630/1/012005>
- Lestari, F., Jibiki, Y., Sasaki, D., Pelupessy, D., Zulys, A. & Imamura, F. (2021). People’s response to potential natural hazard-triggered technological threats after a sudden-onset earthquake in Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3369. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073369>
- Martínez, C., Cienfuegos, R., Inzunza, S., Urrutia, A. & Guerrero, N. (2020). Worst-case tsunami scenario in Cartagena Bay, central Chile: Challenges for coastal risk management. *Ocean and Coastal Management*, 185, 105060. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105060>
- Martínez, C. & Aránguiz, R. (2016). Riesgo de tsunami y planificación resiliente de la costa chilena: la localidad de Boca Sur, San Pedro de la Paz (37° S). *Revista de Geografía Norte Grande*, (64), 33-54. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000200004>
- Matsumaru, R. (2015). Reconstruction from the Indian Ocean tsunami disaster: Case study of Indonesia and Sri Lanka and the philosophy of “Build Back Better”. *Handbook of Coastal Disaster Mitigation for Engineers and Planners*, 581-597. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801060-0.00027-7>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2022). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)*. Gobierno de Chile.

- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2019). *Decreto 469. Aprueba Política Nacional de Ordenamiento Territorial*. Gobierno de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1162254&f=2021-07-05>
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2021). *Ley 21364. Ley Sistema y Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres*. Gobierno de Chile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423&idParte=10257882>
- Moris, R., Contrucci, P. & Ortega, A. (2017). El riesgo en la actualización post-desastre de instrumentos de planificación territorial comunales en Chile 2010-2014. *REDER*, 1(1), 85-100. <https://doi.org/10.55467/reder.v1i1.6>
- Narváez, L., Lavell, A. & Pérez, G. (2009). *La gestión del riesgo de desastres: Un enfoque basado en procesos*. Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina - PREDECAN. http://repo.floodalliance.net/jspui/bitstream/44111/2259/1/procesos_ok.pdf
- Ocampo, R. (2020). *El impacto económico del COVID y el panorama social hacia el 2030 en la región*. Observatorio COVID-19 de la CEPAL. <https://www3.paho.org/ish/images/docs/presentacion-dr-Rolando-Ocampo.pdf>
- Olcina, J. (2008). Cambios en la concepción territorial conceptual y de método de los riesgos naturales. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 12(270), 24. <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-270/sn-270-24.htm>
- Rauld, R., Medina, F., Leyton, F. & Ruiz, S. (2015). Mapa de microzonificación sismo-geológica para Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno*. https://biblioserver.sernageomin.cl/OPAC/DataFiles/14905_v3_pp_106_109.pdf
- Raykov, T. & Marcoulides, G. (2008). *An Introduction to Applied Multivariate Analysis*. Routledge.
- Rinaldi, A. & Bergamini, K. (2020). Inclusión de aprendizajes en torno a la gestión de riesgo de desastres naturales en instrumentos de planificación territorial (2005 - 2015). *Revista de Geografía Norte Grande*, (75), 103-130. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022020000100103>
- Rodríguez, M. T. (2017). *Hacia una conurbación urbana resiliente: La ciudad de Concepción, Chile, y el gran terremoto y tsunami del año 2010*. Editorial Académica Española.
- Ruiz, S. & Madariaga, R. (2018). Historical and recent large megathrust earthquakes in Chile. *Tectonophysics*, 733, 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.01.015>
- Ruiz, S. & Saragoni, R. (2005). Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos de sismogénesis y los efectos del suelo. *IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica*.
- Sampieri, R., Fernández, C. & Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (4ª ed.). McGraw Hill.
- Sandoval, J. (2020). Vulnerabilidad-resiliencia ante el proceso de riesgo-desastre: Un análisis desde la ecología política. *Polis*, (56), 138-154. <https://doi.org/10.32735/S0718-6568/2020-N56-1527>
- Sepúlveda, N., Gálvez, C., Pantoja, G. & Morales, D. (2019). *Respuesta sísmica del área urbana San Antonio-Llolleo, región de Valparaíso*. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/datafiles/IR_73_15879_TEXTO_MAPA.pdf

- Skilodimou, H. D., Bathrellos, G. D., Chousianitis, K., Youssef, A. & Pradhan, B. (2019). Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, 47. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8003-4>
- Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE). (2011). *Guía análisis de riesgos naturales para el Ordenamiento Territorial*. Gobierno de Chile. <https://www.subdere.gov.cl/documentacion/gu%C3%ADa-de-an%C3%A1lisis-de-riesgos-naturales-para-el-ordenamiento-territorial>
- Tapia, R. (2015). Acción del Estado y acción comunitaria en la gestión de la vivienda post erupción del volcán Chaitén, Chile: dos estrategias divergentes. *Magallania*, 43(3), 141-158. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-22442015000300011>
- Valenzuela, V., Maduranga, R., Kularathna, A., Cubelos, G., Norikazu, F., Crichton, R., Quiroz, M., Yavar, R., Izumi, I., Aranguiz, R., Motoharu, O. & Esteban, M. (2019). Comparative analysis of tsunami recovery strategies in small communities in Japan and Chile. *Geosciences*, 9(1), 26. <https://doi.org/10.3390/geosciences9010026>
- Vega-Centeno, I. (2004). ¿Los comedores populares son política social? Entre la nominación y la violencia simbólica. *Nueva Sociedad*, (193), 146-162. https://nuso.org/media/articles/downloads/3224_1.pdf
- Vicuña, M. & León, J. (2022). Desafíos en planificación territorial y resiliencia costera: el caso de la amenaza de tsunamis. En C. Martínez, R. Cienfuegos, J. M. Barragán, S. Navarrete, R. Hidalgo, F. Arenas & L. Fuentes (Eds.), *Hacia una Ley de Costas en Chile: bases para una gestión integrada de Zonas Costeras* (pp. 455-466). Serie GEOlibros.
- Vicuña, M. & Schuster, J. (2021). *Planificación urbana y gestión del riesgo de desastres: desafíos para instrumentos y mecanismos de planificación urbana y territorial*. Serie Policy Paper CIGIDEN. https://www.cigiden.cl/wp-content/uploads/2021/07/PP_Planificacion-Urbana-y-GRD_ISBN-Digital.pdf
- Visconti, C., Carraro, V. & Inzunza, S. (2021). Mapeo colectivo como metodología participativa para el estudio de riesgos de la planificación urbana comunal: una propuesta para Chile. Serie Policy Paper CIGIDEN (Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres). <https://www.cigiden.cl/mapeo-colectivo-como-metodologia-participativa-para-el-estudio-de-riesgos-de-la-planificacion-urbana-comunal-una-propuesta-para-chile/>
- Zenteno, E., Muñoz, P. & Rosso, B. (2022). Urbanización subalterna en tiempos de pandemia. Asentamientos informales en Chile. *Bitácora Urbano Territorial*, 32(2), 267-280. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v32n2.99624>
- Zhou, Y., Li, N., Wu, W., Wu, J. & Shi, P. (2014). Local spatial and temporal factors influencing population and societal vulnerability to natural disasters. *Risk Analysis*, 34(4), 614-639. <https://doi.org/10.1111/risa.12193>