

VÍAS DE EVACUACIÓN E INFRAESTRUCTURA CRÍTICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE TSUNAMIS EN LA CIUDAD DE LA SERENA, CHILE

Carolina-Pía Villagrán^{1*} y María-Victoria Soto²

RESUMEN

Desde la década del noventa, la ciudad de La Serena, capital de la Región de Coquimbo, ha presentado un continuo proceso de expansión urbana, siendo especialmente notorio en la zona costera. El cambio de uso del suelo fue muy rápido, desde el agrícola a condominios, hotelería y construcciones en altura, predominantemente. La expansión urbana en la costa ha incrementado la exposición ante amenazas naturales, como marejadas y tsunamis. En relación a tsunamis, existen estudios que desarrollan proyecciones sobre la ocurrencia potencial de terremotos tsunamigénicos, con foco cercano. Ello constituye un escenario crítico que permite hacer un replanteamiento de la planificación ante riesgos, como también de la infraestructura crítica ante la respuesta. En este contexto, se realiza una evaluación del funcionamiento de las vías de evacuación existentes, además de la relación con diversas variables territoriales asociadas, bajo una perspectiva multidimensional y multiescalar, utilizando Sistemas de Información Geográfico y trabajo de campo, para lograr un escenario o modelo territorial, que permita priorizar acciones y así, aportar a la planificación de la emergencia y a la gestión de riesgos de desastres a nivel local.

PALABRAS CLAVES

Vías de evacuación; Infraestructura crítica; Riesgos; Tsunami; Chile

EVACUATION ROUTES AND CRITICAL INFRASTRUCTURE FOR TSUNAMI RISK MANAGEMENT IN THE CITY OF LA SERENA, CHILE

ABSTRACT

Since the 1990s, the city of La Serena (capital of the Coquimbo Region in Chile), has undergone a continuous process of urban expansion, especially in the coastal area. The change in land use has been very rapid, from agricultural land to condominiums, hotels, and high-rise buildings, predominantly. Urban expansion along the coast has increased exposure to natural hazards, such as storm surges and tsunamis. In relation to tsunamis, there are studies that develop projections on the potential occurrence of tsunamigenic earthquakes, with a nearby focus. This is a critical scenario that allows for a rethinking of risk planning, as well as critical infrastructure for response. In this context, an evaluation of the functioning of existing evacuation routes is carried out, in addition to the relationship with various associated territorial variables, under a multidimensional and multiscale perspective. We use Geographic Information Systems and field work to achieve a scenario or territorial model which allows prioritizing actions and thus, contribute to emergency planning and disaster risk management at the local level.

KEYWORDS

Evacuation roads; Critical infrastructure; Risks; Tsunami; Chile

1. División de Planificación y Desarrollo Regional, Gobierno Regional de Coquimbo, Coquimbo, Chile.

2. Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

*Autora de correspondencia: cvillagran@gorecoquimbo.cl

DOI:

<https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.144>

RECIBIDO

25 de abril de 2023

ACEPTADO

14 de agosto de 2023

PUBLICADO

1 de enero de 2024

Formato cita

Recomendada (APA):

Villagrán, C-P. & Soto, M-V. (2024). Vías de Evacuación e Infraestructura Crítica para la Gestión del Riesgo de Tsunamis en la ciudad de La Serena, Chile. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 8(1), 151-170. <https://doi.org/10.55467/reder.v8i1.144>



Todos los artículos publicados en REDER siguen una política de Acceso Abierto y se respaldan en una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres (REDER)

INTRODUCCIÓN

La costa de la ciudad de La Serena se localiza en una terraza marina baja, con cordones litorales y de dunas, humedales y playas arenosas, expuesta a distintos tipos de amenazas, como inundaciones recurrentes (por precipitaciones extremas/suelos de mal drenaje), marejadas y tsunamis (Soto et al., 2015; Soto et al., 2017). Se identifican condiciones de vulnerabilidad asociadas, por la configuración urbana que se ha emplazado en una zona expuesta a amenazas (Castro et al., 2018), como también frente a la ocurrencia de un evento sísmico tsunamigénico de gran magnitud, cuyo foco de generación se produzca cercano a la costa (Serrano et al., 2019) y el impacto de eventos de campo lejano (Wang et al., 2019; Wang et al., 2021). Así se conforman las condiciones propicias para un desastre, ya que el tiempo y la capacidad de respuesta de la ciudad de La Serena, se ve reducida para una evacuación hacia zonas seguras.

Por otra parte, el instrumento de planificación territorial de nivel comunal, el Plan Regulador Comunal de la Serena, tanto el recientemente aprobado (Municipalidad de La Serena, 2020) y el de 2004, permiten actualmente una urbanización progresiva en la costa de La Serena (Castro et al., 2021), crecimiento y apogeo que se gesta desde la década de los 90. Desde esa fecha comienza una ocupación residencial en función al entramado urbano costero (Aguirre et al., 2018; BID, 2018), en donde predominan las construcciones de edificios en altura, ubicados en primera y segunda línea en la costa (Ortiz et al., 2002; Hidalgo et al., 2009).

Sin embargo, también existen sectores residenciales con viviendas de uno y dos niveles que se encuentran emplazadas cercanas a la avenida principal de la ciudad, que es la Avenida Francisco de Aguirre, a este sector se denomina Puertas del Mar. También se debe mencionar el desarrollo residencial emergente al norte de La Serena, como en la Caleta San Pedro (Castro et al., 2021) y Sector de Serena Golf.

La urbanización de la zona costera no ha sido acompañada de una planificación vial acorde a la población residente, teniendo escasas vías conectoras desde la zona costera hacia la zona céntrica de la ciudad, además Aguirre et al. (2018) plantea otros ejemplos de problemas de conectividad, como la falta de fluidez vial urbana, debido a la presencia de la carretera Ruta 5, que intersecta a la ciudad, dividiendo la zona costera de la zona céntrica de La Serena. En este entramado vial, existen algunos ejes consolidados pavimentados y otros sin pavimento, para uso vehicular y peatonales, que son todos indistintamente, considerados dentro de la planificación local ante emergencias, como vías de evacuación ante un tsunami (Figura 1).

Consecuente a lo anterior, en la ciudad de La Serena, es primordial evaluar territorialmente la infraestructura utilizada para la evacuación de la población expuesta a tsunami, es decir, las vías de evacuación y la infraestructura crítica asociada a la primera respuesta ante una emergencia. Ello cobra aún más interés, debido a las características de vulnerabilidad por la configuración urbana en la costa, la compleja consolidación a nivel local de las vías de evacuación planificadas, las que, además, están en proceso de cambios y redefiniciones legales, según gestión de riesgos de desastres en el país (Ley 21.364, 2021), sin mencionar explícitamente, una confusa gestión de administración y mantención de dichas vías de evacuación.

En este sentido, se abordó el estudio de las vías de evacuación e infraestructura crítica de respuesta ante tsunami y las variables territoriales asociadas a la evacuación por tsunami, para finalmente sistematizar la información recabada y proponer un modelo territorial que permita la planificación de la evacuación a nivel local, con enfoque territorial y multiescalar, como un aporte a la gestión del riesgo de desastres en La Serena.

METODOLOGÍA

Enfoque de la Investigación

Para el desarrollo de esta investigación se consideró la totalidad de las vías de evacuación por tsunami contempladas en el Plan de Emergencia de la Ciudad de La Serena (Municipalidad de La Serena, 2022), que es un Plan de Emergencia Comunal que tuvo una última actualización en el año 2018 y que contempla 11 vías de evacuación (Figura 1), que conectan la línea de costa con los puntos de encuentros emplazados, teóricamente en una zona segura.

Si bien existen diversas metodologías de pronóstico de tsunami (Wang et al., 2019; Wang et al., 2021), se utilizó el enfoque de valoración del riesgo y el foco, en la potencial evacuación, tales como las empleadas por Williams et al., (2019); Martínez et al. (2020); León et al. (2021) y Wang

& Jia (2021), para lograr una zonificación del peligro de tsunami. Martínez et al. (2017), consideró la información relevante a ser incluida en el análisis, como por ejemplo las variables de topografía, vialidad, uso de suelo, zona de seguridad de evacuación y la forma urbana. También señala que existe en el país, poco desarrollo sobre esta materia, concluyendo que una de las metodologías más completas, es la modelación de agentes o simulación de agentes, que permite incluir diversas variables y evaluar el comportamiento humano. Sin embargo, también esta metodología es la más difícil de validar por los grados de incertidumbre en la conducta humana, tiempo de evaluación y recursos computacionales en el contexto nacional (Martínez et al., 2017; León et al., 2021).



Figura 1. Área de Estudio Vías de Evacuación por Tsunami en La Serena

Fuente: ONEMI (2018).

Nota: Plano Vigente a la fecha de elaboración de este estudio.

Estos son aspectos importantes que se consideraron para diseñar una metodología de análisis abordable, con variables territoriales que aporten a la planificación de la evacuación, con un modelo replicable e integrador, sobre todo para utilidad y aplicabilidad en los gobiernos locales y regionales.

Es importante precisar que, para analizar la evacuación ante tsunami, además de variables con expresión espacial y cuantificables, existen variables que consideran las subjetividades en el riesgo o los aspectos impredecibles asociados a la conducta humana, la capacidad de resiliencia del individuo o la capacidad de autogestión, también el grado de conocimiento del manejo de la emergencia respecto del Plan de Emergencia Comunal y la percepción del riesgo (Cid et al., 2012; Castro et al., 2021). Sin embargo, las componentes subjetivas relacionadas al tema y la cultura del riesgo no son consideradas en esta investigación, aunque no se desconoce su enorme valor en la problemática analizada y más aún, en la planificación de la evacuación ante tsunami. Estos aspectos sociales en la evacuación podrían ser integrados y así complementar la metodología en un siguiente paso de la investigación.

Fases de la investigación

Fase 1: Identificación de información clave, recopilación y análisis de variables territoriales mediante Sistemas de Información Geográfico.

Se centró en la obtención de información de aquellas variables territoriales para el análisis (con expresión espacial), como las siguientes:

- » Las vías de evacuación peatonales, provistas por el proyecto del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) del año 2018.
- » Las vías de evacuación del Plan de Emergencia Comunal de La Serena actualizado y aprobado por el Comité Comunal de Protección Civil y la Oficina Nacional de Emergencias ONEMI (ONEMI, 2018) y vigente a la fecha de elaboración de este estudio.
- » La línea de seguridad planificada por el municipio, Información de ONEMI de la Cota 30 y los puntos de encuentro.
- » La población censal (2002 y 2017) y la población proyectada al 2022, calculada mediante los registros de permisos de edificación y certificados de recepción final del INE (Instituto Nacional de Estadísticas) entre los años 2011 al 2022.
- » Fotointerpretación de edificaciones.
- » La topografía costera.
- » Entramado urbano consolidado y no consolidado.

Estas variables fueron analizadas e integradas para obtener un diagnóstico territorial-espacial y de manera paralela, incorporar enfoques obtenidos de las entrevistas a actores claves de la Municipalidad de La Serena, como Asesora Urbanista de la Secretaría Comunal de Planificación (SECPLAN), la Encargada de Departamento en la Dirección de Gestión de Riesgos de Desastres (GRD) Municipal y el Director Regional de ONEMI, actual Servicio Nacional de Prevención y Reducción de Desastres (SENAPRED), con el fin de detectar las interacciones y visiones del funcionamiento de la evacuación, en un mapa conceptual que plasmara el sistema de relaciones entre variables en una fase final.

En cuanto a las proyecciones de población al 2022, se realizó una homologación a nivel de manzana de la información geoespacial de los censos 2002 y 2017, para luego hacer el cálculo de proyección aritmética en cada manzana de acuerdo con los censos disponibles.

Para desarrollar el mapa de pendientes, se consideró las curvas de nivel cada un metro, elaborada para el proyecto PROTEGER COQUIMBO (2010). Éste se realizó mediante la herramienta de Sistema de Información Geográfico (SIG) Slope¹, generando un mapa de pendiente, clasificado en grados. Este mapa es fundamental para poder aplicar los criterios de Moris et al. (2010), que adjudica una ponderación a la variable tiempo y velocidad de desplazamiento (Tabla 1), según la pendiente.

Pendientes (*)	Tiempo de Evacuación (Minutos)	Km/h	Riesgo
<5,6°	10	4,48	Bajo
5,6° - 8°	12	3,29	Medio Bajo
8° - 11,2	15	2,72	Medio
11,2°-14°	20	2,17	Alto
>14°	30	1,12	Muy Alto

Tabla 1. Rangos de Tiempo y Velocidades de desplazamiento según Pendientes
Fuente: Moris et al., (2010).

Considerando la longitud de cada vía y la velocidad según Moris et al. (2010), se obtuvo el tiempo estimado de desplazamiento, de acuerdo con la fórmula de la velocidad del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU et al., 2017, p.53), con el fin de contrastar dichos parámetros de tiempo con los resultados empíricos en la fase 2.

1. Slope es una herramienta de ARCGIS (ESRI) utilizada para realizar análisis de pendientes partiendo de Modelos Digitales de Elevación (DEM) bajo unidades de medida en grados o porcentaje.

Fase 2: Trabajo de Campo, evaluación y detección de barreras u obstrucciones

En esta etapa de investigación, se validó la información recopilada en la fase 1. Las actividades realizadas fueron la observación, la constatación de información en las vías, registro del estado y condición actual e identificación de barreras. Este trabajo es concordante con la clasificación de micro-vulnerabilidades urbanas, evaluación aplicada a las vías de evacuación, en el estudio realizado en la ciudad de Iquique por Álvarez et al. (2018). A través del trabajo de campo, se obtuvo la siguiente descripción de variables en la ciudad de La Serena:

- » La identificación del estado actual de cada vía, en cuanto a las condiciones de equipamiento, como por ejemplo el estado de la luminaria (autosustentada en aquellas vías de evacuación peatonales, con paneles fotovoltaicos),
- » señalizaciones y su estado,
- » presencia de microbasurales, espacios de rezago u obsolescencia,
- » zanjas de canales de regadío que drenan hacia la costa y podrían ser obstáculos,
- » y el estado de las calles circundantes a las vías de evacuación, la vía férrea y la carretera Ruta 5, que corta la continuidad en la evacuación.

Esta fase se centra en la observación en campo, se constata empíricamente los obstáculos en cada vía de evacuación, caracterizándolas espacial y descriptivamente en una ficha por vía, asignando a cada variable una valoración adaptada de la escala de Likert. Cada aspecto observado, corresponde a una variable para su integración y análisis espacial mediante Sistema de Información Geográfico, para la detección de zonas críticas (Villagrán, 2022).

Evaluación del Estado de las Vías de Evacuación y de la Infraestructura Crítica: De acuerdo con metodologías para la planificación de la evacuación, como Lagos (2012); Martínez et al. (2017); León et al. (2018), Wang & Jia (2021), variables territoriales con expresión espacial como configuración urbana, la vialidad y la población, eran esenciales en las modelaciones del riesgo y se consideran en este estudio.

Particularmente, se recoge la incorporación de variables de mantención de las rutas, en concordancia con la clasificación de micro-vulnerabilidades urbanas, analizadas en Iquique por Álvarez et al. (2018). A este respecto, es un gran problema la disminución del área peatonal efectivamente disponible en las vías de evacuación, generadas por obstrucciones en las aceras, que ralentiza la circulación peatonal.

En el estudio de Álvarez et al., (2018), se considera una taxonomía de 3 categorías para la evaluación de la evacuación, a saber, (1) uso inapropiado, (2) mantenimiento inadecuado y (3) problemas relacionados con el diseño de rutas de evacuación (León & March, 2016). Para este estudio se desarrolló una taxonomía propia, definiendo 6 variables territoriales en las vías de evacuación, que pudiesen ser espacializadas. Para ello se generó un catastro descriptivo mediante una ficha ad hoc, para cada una de las 11 vías de evacuación del área de estudio (Villagrán, 2022).

Las variables territoriales para la evaluación son las siguientes:

1. Estado de luminaria
2. Obstáculos esporádicos (microbasurales, arbustos o matorral costero, escombros, entre otros)
3. Estado de la carpeta de la vía²
4. Interconectividad para evacuar
5. Presencia y/o Estado de la Señalética
6. Dificultad estructural para Evacuar (Infraestructura Crítica).

Con respecto a la Escala de Valoración para la Evaluación. Se considera la escala de Likert de Valor, debido que el objetivo es evaluar su estado actual con una metodología simple, rápida y que permita valorar en grados cuantitativos, buscando conseguir oportunidades de mejora o mitigación a los problemas de las vías de evacuación e infraestructura crítica costera en la ciudad de La Serena.

2. Carpeta: Se utiliza el termino como cubierta del camino o vía de evacuación. Las vías de evacuación por tsunami analizadas en la ciudad de La Serena son de distinto material de construcción, existen vías de asfalto, vías de tierra y ripio de tipo peatonales, y calzadas de hormigón sin veredas como ejes vehiculares.

La escala de Likert más usada, es la ordinal continua de 5 valores, en donde 1) es Pésimo o Muy Malo, 2) es Malo, 3) es Regular, 4) es Bueno 5) Muy Bueno. Para esta evaluación en las vías de evacuación, se establece una escala de valoración, de acuerdo con la escala de Likert, simplificada de sólo 3 valores de medición, cuya asignación negativa se invierte para que los valores más altos sean críticos, definiendo lo siguiente:

1. es Bueno [B]
2. 2) es Regular [R]
3. 3) es Malo [M].

Las (6) variables de la evaluación en terreno y la escala de valoración, se definen de acuerdo con ciertos parámetros y orientaciones dadas en la Guía de referencia para Sistemas Comunales de Evacuación por Tsunami (MINVU, 2017), en cuanto a su condición y estado de conservación. Se aplicó la escala de valoración dada mediante la ficha descriptiva de cada vía y obteniendo como resultado, la Tabla 3, resumen de evaluación de las vías según variables territoriales y mapa en función a cada variable, observada totalmente en trabajo de campo.

Fase 3: Obtención de una evaluación multidimensional y territorial

En esta etapa se buscó relacionar todas las variables consideradas en las fases anteriores con el trabajo de campo y la evaluación de cada vía, rescatando la revisión bibliográfica, las metodologías como las de Martínez et al. (2017); Álvarez et al. (2018) y Wang & Jia (2021), sobre las variables para una evaluación de evacuación ante tsunami. Finalmente, se desarrolló una sistematización de variables territoriales asociadas de estas referencias.

Para obtener una propuesta territorial para la evacuación se utilizó Sistema de Información Geográfico, el software Arcgis versión 10.8.1, mediante el análisis de superposición ponderada o por peso de variables territoriales, utilizando herramientas como Overlay, puntualmente la categoría Weighted Overlay sobreposición ponderada de capas.

Resumiendo, el procesamiento en Sistemas de Información Geográfico, en 3 pasos:

1. Simplificación de registros mediante la herramienta Dissolve: la cobertura de entrada corresponde a las 7 variables, que cada una contienen diversos registros con información sobre varios atributos de entidad, se simplifica la tabla de atributo, resultando los registros de 1 a 3 requeridos en cada caso.
2. Transformación a formato Ráster de las capas Vectoriales: herramienta de conversión polygon to raster, en este formato permite superponer capas.
3. Realización de Modelo de Geoprocesamiento de sobreposición ponderada mediante la ventana de trabajo Model Builder: En este entorno de procesamiento, se utilizó la herramienta Overlay, la categoría Weighted Overlay sobreposición ponderada de capas, que sirve para asignar pesos para una sobreposición territorial, para ello, se establece una evaluación de criterios, que puede ser variable, en función a escenarios de análisis.

De esta manera se llega a definir modelos territoriales, de acuerdo a ponderaciones, de manera de determinar cuáles son las vías de evacuación y zonas críticas, según las variables de población, estado de las vías y aspectos estructurales. Esto también está vinculado a la capacidad de gestión y articulación de actores que intervienen en la gestión del riesgo a nivel local, estableciendo un enlace entre las acciones de mantenimiento, de gestión, y estructurales con la capacidad de ejecución de las instituciones en el modelo de variables asociadas y principales actores.

En investigaciones relacionadas a la planificación de la evacuación como en Scheer et al. (2012), Martínez et al. (2017) y León et al. (2018), existe consenso en cuanto a la complejidad metodológica para abordar estudios de modelaciones de evacuación, que reflejen adecuadamente el accionar humano. Algunas de las razones de esto, es el escaso y desigual acceso a la información, las limitadas capacidades de procesamiento numérico en instituciones públicas, la cantidad de variables implicadas, y en este estudio se centra en las relaciones territoriales asociadas a la evacuación, considerando variables físicas como el relieve; de gestión local como la evaluación del estado de las vías y las variables estructurales, por ello se denomina una evaluación multidimensional, que puede ser perfeccionada con nuevos análisis en el futuro y entregar un aporte con perspectiva territorial a la gestión de riesgos de desastres local.

RESULTADOS

Variables Territoriales relacionadas a la infraestructura crítica para la evacuación costera

Variable Físico Natural (Topografía)

En la ciudad de La Serena, específicamente el área donde se encuentran las vías de evacuación por tsunami, se identifican distintos rangos de pendientes, no obstante, corresponde a una extensa terraza marina baja (Paskoff, 1970), se reconocieron distintos niveles de pendientes en cada vía de evacuación.

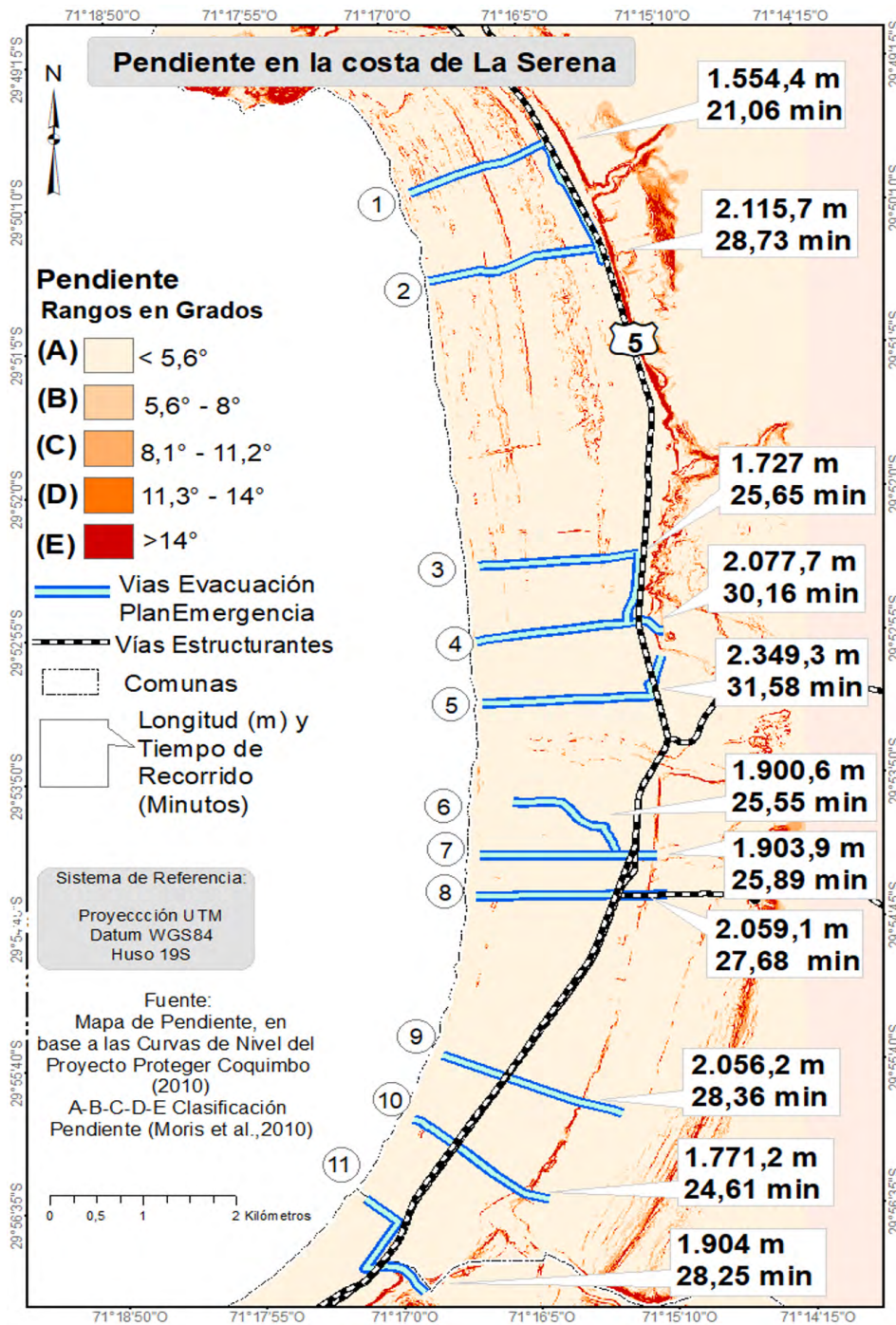


Figura 2. Mapa de Pendiente y relación con Velocidades de Desplazamiento
Fuentes: Autoras, 2024, en base a Curvas de nivel de Proteger Coquimbo (2010) en Villagrán (2022).

El mapa de pendiente se categorizó de acuerdo con los rangos utilizados por Moris et al. (2010) y sugeridos en la Guía de Referencia para Sistemas de Evacuación Comunales por Tsunami (MINVU et al., 2017, p.85), de acuerdo con la clasificación sugerida de velocidades de desplazamiento según la pendiente.

Con esta clasificación, se realizó la estimación de distancia y tiempo de desplazamiento en las 11 vías de evacuación (Figura 1), resultando que el tiempo de desplazamiento total supera los 20 minutos para recorrer cada uno de estos corredores, desde la costa hasta la zona segura. Las distancias fluctúan entre 1,5 y 2,3 kilómetros de longitud en todas las vías de evacuación por tsunami.

Las vías de evacuación N° 02, Av. El Jardín, N° 04, San Pedro y N°5, Rodillo, son las más largas y también las que presentan los mayores márgenes de tiempo de desplazamiento para llegar a una zona segura (Figura 2). La aproximación anterior, permite dimensionar el tiempo de acuerdo con la componente física del relieve, sin embargo, existen otras dimensiones que complejizan el cumplimiento de estos márgenes de tiempo, como son los obstáculos. Entre estos se consideran los ejes viales estructurantes, como es la Ruta 5 y la caletería, que intersectan a todas las vías de evacuación; además se debe considerar el estado de la carpeta (superficie del camino) la presencia de cierres irregulares y, otras barreras, que alteran el tiempo para el arribo a una zona de seguridad.

En función al relieve, de acuerdo a los parámetros de Moris et al. (2010), se constata que existe un margen de tiempo significativo para poder salir de la zona bajo amenaza de inundación por tsunami en la ciudad de La Serena, considerando que el umbral recomendado para la evacuación en la Guía de Referencia para Sistemas de Evacuación Comunes por Tsunami (MINVU et al., 2017, p.19) es de 15 minutos para evacuación. Los resultados en este estudio estima tiempos entre los 21 a 30 minutos (sin considerar las obstrucciones en las vías) para poder llegar a una zona teóricamente segura.

Variable de Población Actual relacionada a la Evacuación por Tsunami

Se presentan dos gráficas correspondientes a los censos 2002 y 2017, para contrastar la diferenciación de sectores y determinar la ocupación urbana costera actual (Figura 3).

De esta información se desprende con mayor detalle el aumento de la ocupación y crecimiento de la población. En el año 2017 surgen nuevas urbanizaciones con rangos altos de población en los sectores denominados Puertas del Mar y sector El Faro, cercanos al eje de la Avenida Francisco de Aguirre (Figura 3), como también un aumento de población en las construcciones en primera y segunda línea de la costa, cercano a la Avenida del Mar, eje turístico costero de la ciudad. Estos sectores cuentan solo con la vía de evacuación N°7.

A este respecto, se considera a la Avenida del Mar, como una obra vial detonante de urbanización y servicios turísticos en el territorio desde su implementación, que ha hecho perdurar su impacto en el tiempo (Hidalgo et al., 2009).

Por otra parte, existe un contraste en cuanto a la proyección de población considerada en el proyecto del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) sobre Vías de evacuación, que se estimó para la etapa de diseño de construcción de las vías de evacuación peatonales en La Serena. Un ejemplo de ello, en la Vía de evacuación N°6 Avenida Puertas del Mar (Figura 1 y Figura 4), y la cantidad de población estimada a beneficiarse para la evacuación. En el diseño de esta iniciativa, se estimó 2.906 habitantes. Sin embargo, la población actual estimada para el año 2022, al norte de la vía de evacuación N°6, asciende a los 11.136 habitantes.

Similar situación se aprecia con las proyecciones de población de las vías N°7 y N°8, aun cuando por la forma del entramado urbano en el sector de Puertas del Mar, se presenta de manera oblicua, desembocando gran parte de sus ejes viales en la Avenida Francisco de Aguirre, que es considerada una vía de evacuación tanto peatonal como vehicular y que, concentraría gran parte de la población de todo el sector denominado Sector Puertas del Mar y El Faro-Avenida Francisco de Aguirre.

De esta forma, este sector es un foco de densidad de población importante en la costa de La Serena, conteniendo alrededor de 23.000 habitantes expuestos, en una zona potencialmente inundable por tsunami y que requiere de corredores alternativos a la vía n°7 altamente congestionada, para trasladarse hacia una zona segura.

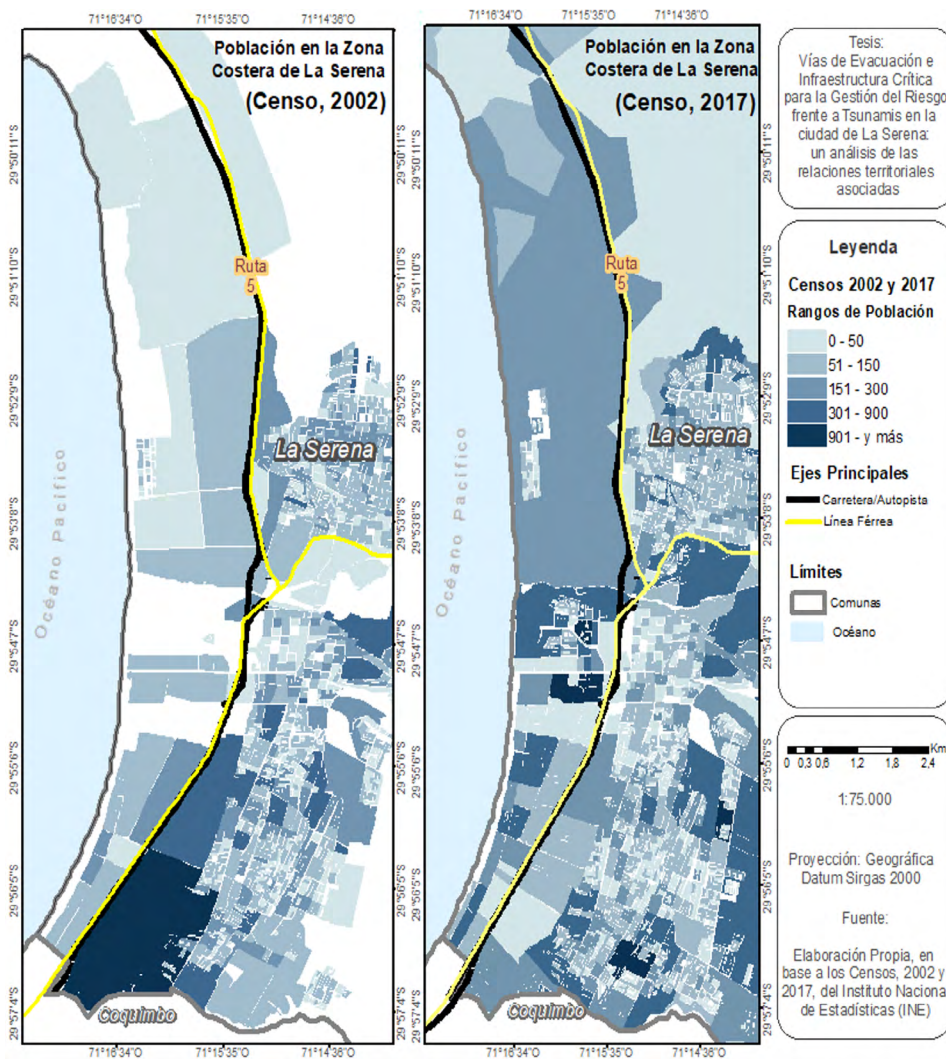


Figura 3. Mapas de Población según Censos 2002 y 2017
Fuente: Autoras, 2024, en base a los Censos 2002 y 2017 (INE), en Villagrán (2022).

Es importante tener una aproximación de la cifra actual de población costera en la ciudad de La Serena, que alcanzaría los 58.290 habitantes (Figura 4), de acuerdo con la información complementaria de certificados de recepción final y permisos de edificación del INE (años 2010 al 2022). Esta información fue validada por una fotointerpretación actual de viviendas, multiplicando cada unidad de vivienda por 3 habitantes, para obtener una nueva estimación de población al 2022 que se encuentra en la zona bajo amenaza de tsunami (Figura 4 y Tabla 2).

Las cifras de población expuesta en zonas inundables (58.290 habitantes), contrasta con las estimaciones de población recientes (Diario el Día, 2021), como las estimaciones del informe del Sistema de Indicadores y Estándares de Desarrollo Urbano (SIEDU) del año 2019, elaborado por el Consejo Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU) y el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), que planteaba que en la Comuna de La Serena, unas 24.169 personas se encontraban viviendo expuestas a inundación por tsunami (11,2% de la comuna).

De acuerdo con los resultados de este estudio, la población costera en La Serena expuesta a tsunami bordea los 58.290 habitantes, cuyo porcentaje expuesto a riesgo alcanzaría el 24,2% de la población total del territorio comunal de La Serena.

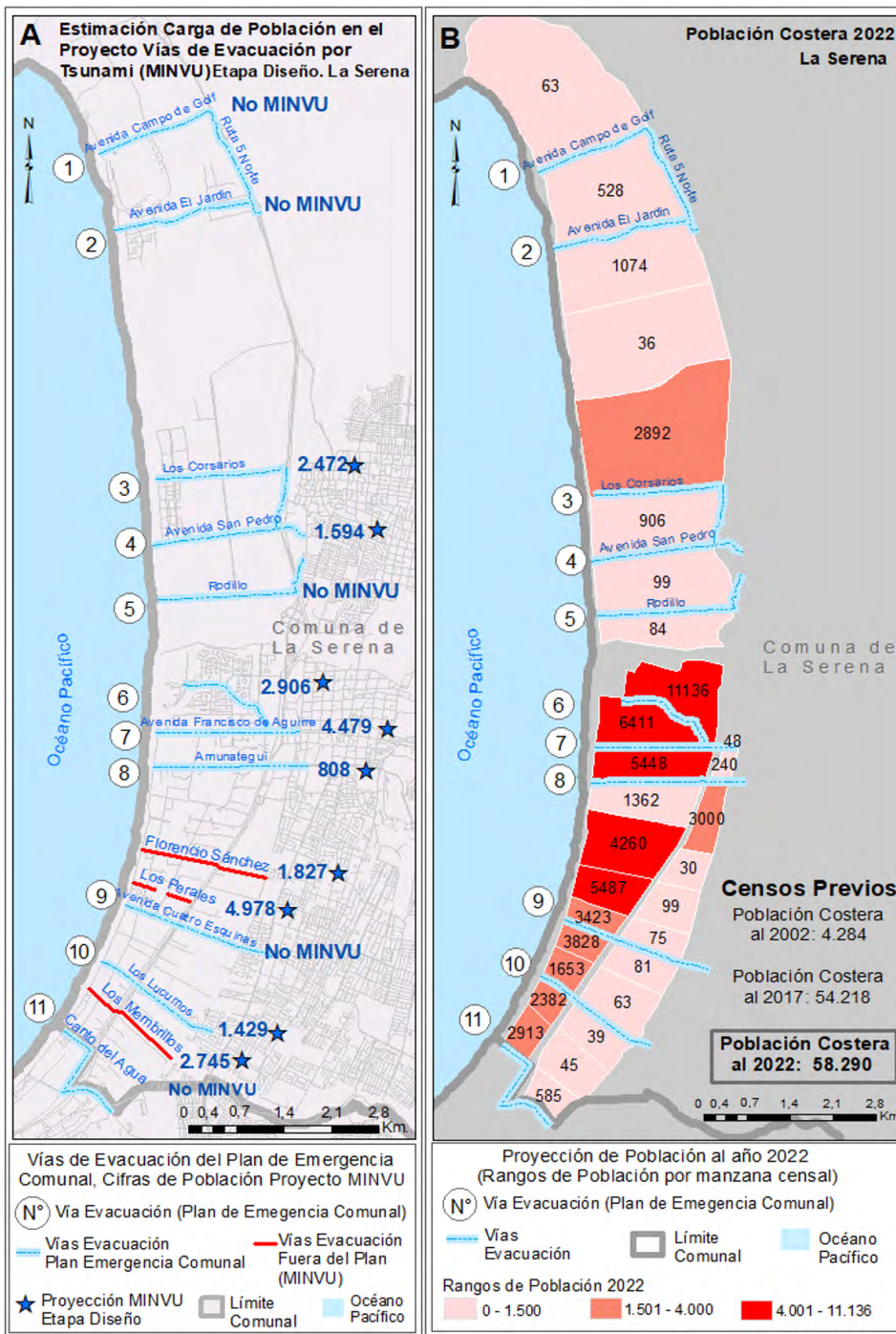


Figura 4. Población Estimada en Proyecto Vías de evacuación por Tsunami de MINVU (2014) y la Población Actual Estimada para el año 2022
 Fuente: Autoras, 2024, en base a (A) información del Banco Integrado de Proyectos (BIP), proveniente del Gobierno Regional de Coquimbo (2022) y (B) Población 2022 por unidad de vivienda en base a fotointerpretación.
 Nota: Registros de permisos de edificación y certificados de recepción final del INE (2011 al 2022).

Vías de Evacuación (Plan de Emergencia Comunal)	(Estimación 2022) Rangos de Población
1. Av. Campo de Golf	800-1.500
2. Av. El Jardín	800-1.500
3. Los Corsarios	3.000-4.000
4. San Pedro	1.500-2.500
5. Rodillo (Camping Maki Pavi)	1.000-2.000
6. Av. Parque Puertas del Mar	9.000-13.000
7. Av. Francisco de Aguirre	11.000-16.000
8. Amunategui	3.000-4.000
9. Av. Cuatro Esquinas	5.000-7.000
10. Los Lúcumos	2.500-3.000
11. Canto del Agua – Regimiento Arica	2.500-3.500

Tabla 2. Estimación de Rangos de Población en Vías de Evacuación al año 2022

Fuente: Autoras, 2024.

Nota: Estimación de Población 2022 por unidad de vivienda en base a fotointerpretación y Permisos de Edificación y Certificados de Recepción Final del INE (2011-2022).

Infraestructura Crítica y Vías de Evacuación

Dentro de la Infraestructura considerada en La Serena, se puede mencionar lo siguiente:

a. Vías de Evacuación y Puntos de Encuentros

- » Existen 11 vías de evacuación contempladas en el Plan de Emergencia Comunal de La Serena, en el Plan Específico para tsunamis, se establecen corredores de evacuación y puntos de encuentros, que presentan una serie de complejidades presentadas en este estudio.

b. Infraestructura Vial

- » Ruta 5 Norte: Eje longitudinal de relevancia nacional, que se inserta en la conurbación de La Serena-Coquimbo; dispone de doble calzada y cruza transversalmente las vías de evacuación de tsunamis.
- » Trama Urbana Consolidada: La zona costera presenta una red de caminos que se han ido consolidando en el proceso de urbanización, además algunos caminos contienen comercio, servicios y proyectos inmobiliarios. Se consideran vías importantes, la Avenida Francisco de Aguirre, Cuatro Esquinas, Avenida del Mar, además calles como Libertad, Juan José Latorre (Figura 1).
- » Trama Urbana No Consolidada (caminos de tierra interiores): Corresponde a aquellas vías que existen como parte de los corredores que permiten el acceso a antiguos campos agrícolas en la parte baja de la ciudad de La Serena y algunos caminos que conectan internamente las vías de evacuación.
- » La Línea Férrea: Vía ferroviaria paralela a la Carretera Ruta 5. La operación de la vía se realiza a razón de dos turnos de 10 horas por día. Las locomotoras realizan 12 despachos en promedio al día, estimando 1 recorrido cada 1 hora, interceptando a las vías de evacuación (Figura 3 y Figura 6).

Resultados de la Evaluación en las Vías de Evacuación por Tsunami en La Serena

El resultado de la evaluación de las 6 variables (Tabla 3), refleja una valoración del estado general en cada vía de evacuación, sin embargo, en el detalle de esta descripción en el trabajo de campo, cada vía de evacuación, presenta resultados diferenciados a lo largo de su recorrido, por ejemplo, la vía 8) Amunategui presenta distinta condición de estado de luminaria (V1), a lo largo de su extensión entre el tramo costero y el tramo interior de esta vía (Figura 5).

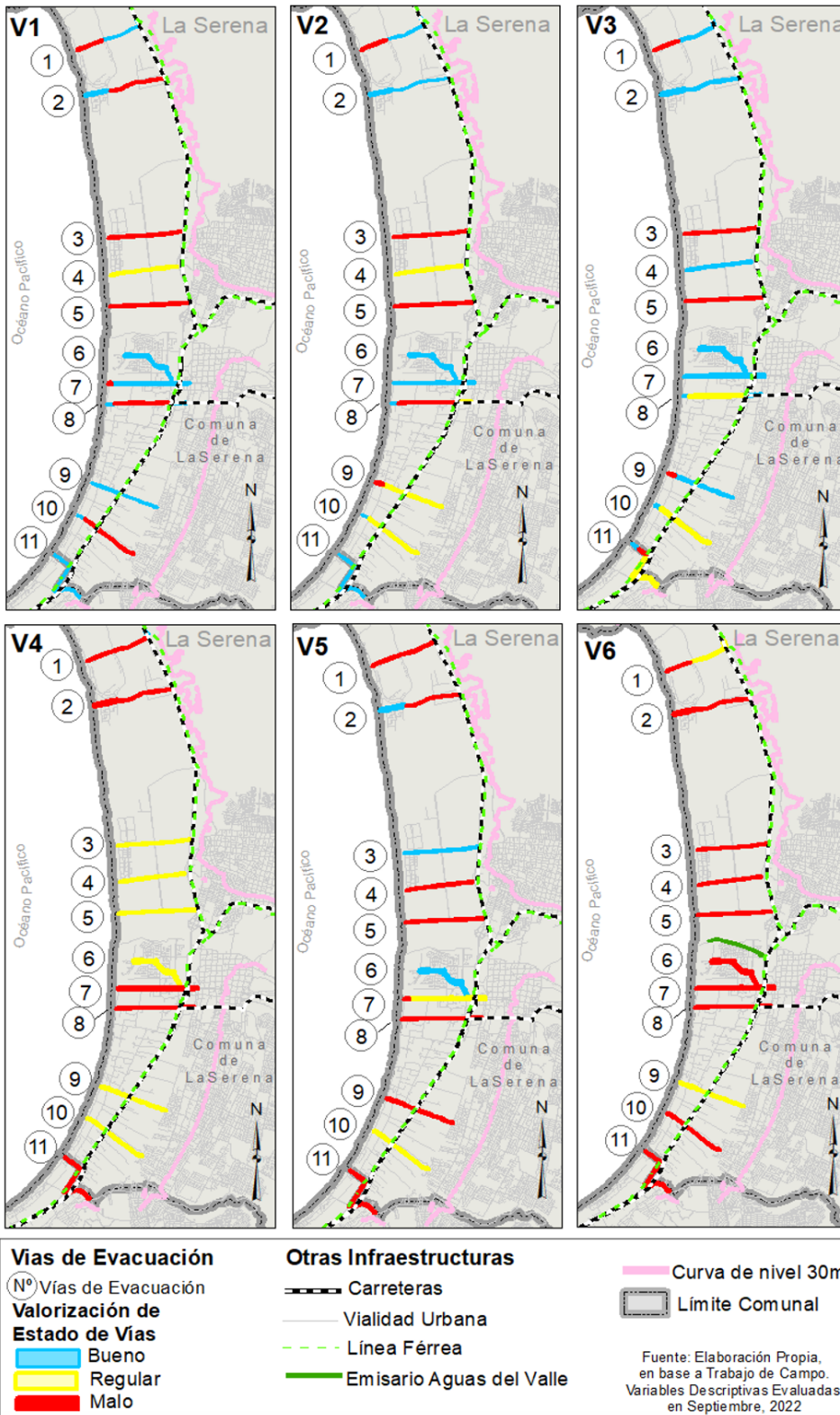


Figura 5. Mapas de la Evaluación de Variables

Fuente: Autoras, 2024.

Nota: En base al trabajo de campo, evaluación de variables realizado en septiembre de 2022 (Villagrán, 2022).

		V1			V2			V3			V4			V5			V6				
Escala de Valoración		Estado de Luminaria			Obstáculos Esporádicos			Estado de la Carpeta			Interconectividad para Evacuar			Presencia/Estado Señalética			Dificultad Estructural (IC)				
B: Bueno (1) R: Regular (2) M: Malo (3)																					
Evaluación de Variables (6)																					
Valoración		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M	Total	
Vías de Evacuación	1. Av Campo de Golf	1			1			1						3						2	11
	2. Av. El Jardín		2			1			1					3						3	13
	3. Los Corsarios			3			3			3		2		1						3	15
	4. San Pedro		2			2			1			2					3			3	13
	5. Rodillo			3			3			3		2					3			3	17
	6. Puertas del Mar	1			1			1				2		1						3	9
	7. Av. Francisco de Aguirre	1			1			1				3		2						3	11
	8. Amunategui			3			3		2			3					3			3	17
	9. Cuatro Esquinas	1				2			1			2					3	2		2	12
	10. Los Lúcumos			3		2			2			2		2						3	14
	11. Canto del Agua	1			1					2				3						3	13

Tabla 3. Resumen de Evaluación de las Vías Según Variables Territoriales
Fuente: Autoras, 2024, en base al trabajo de campo, septiembre de 2022.

Sistematización entre la infraestructura crítica (IC), las vías de evacuación y variables territoriales

De acuerdo con los estudios relacionados a la evacuación y las diversas metodologías consideradas, en este trabajo se consideran algunas condicionantes territoriales relevantes, ya aplicadas por autores como Martínez et al. (2017); León et al. (2021); Wang & Jia (2021), quienes señalan cómo de relevancia, la población costera, el relieve, la trama de la vialidad, entre otras variables.

Además, se consideran variables dinámicas locales, en concordancia con el trabajo de detección de micro vulnerabilidades por Álvarez et al. (2018), definiendo 6 variables descriptivas y de mantenimiento, aplicadas al caso de la costa de La Serena.

Se consideraron las 6 variables previamente evaluadas en el trabajo de campo (fase 2), que son variables a nivel de microescala, altamente dinámicas y de transformación continua; finalmente en esta fase, se integró a la población y a la infraestructura crítica (variables de macro escala). Por lo tanto, para la sistematización se consideraron en total, 7 variables territoriales, con expresión espacial:

- » V1: Estado de la Luminaria
- » V2: Obstáculos Esporádicos
- » V3: estado de la carpeta vía
- » V4: Interconectividad para evacuar
- » V5: Presencia/ Estado de la señalética
- » V6: Dificultad estructural (Infraestructura Crítica)
- » V7: Población (actualizada).

La población es una variable territorial con una desagregación macro en este caso, externa a las vías y directamente relacionada a la evacuación, y para su integración se consideran aquellas cifras de población colindantes a las vías de evacuación.

Investigaciones como las de Martínez et al. (2017); Ito et al., (2020, 2015); León et al. (2018, 2021); (Wang & Jia, 2021), desarrollan la modelación de evacuación y determinan escenarios, utilizando metodologías y herramientas sofisticadas como Simuladores Basados en Agentes y Sistemas de Información Geográfica espacio-temporales, para determinar el accionar humano; existiendo entidades internacionales especializadas en estos ámbitos, como el Instituto de Investigación para la Prevención de Desastres de la Universidad de Kyoto en Japón. De ello se rescató la utilización de los Sistemas de Información Geográficos (SIG) para integrar las variables analizadas con herramientas que pudiesen facilitar una modelación geográfica simplificada, en comparación a las sofisticadas modelaciones de agentes ya mencionadas.

Se puede relacionar este trabajo en cierta medida con el Proyecto Riesgo Urbano: una Evaluación y Preparación de la Emergencia desde un Enfoque Integral, en la Ciudad de La Serena (Castro, 2021), que incorpora diversas herramientas para modelar el riesgo urbano “Mutiamenaza”, enfocado en los organismos de respuesta y gobiernos locales.

En esta instancia final de integración de variables, se realizó el procesamiento de datos mediante Sistemas de Información Geográficos, con el Software ArcGis versión 10.8.1, utilizando herramientas para integrar las capas de información por variables, desde la 1 a la 7, recordando que se evaluaron de manera empírica 6 variables en la fase 2 (Figura 5) y en la instancia final, se incorporó la variable de población, resultando 7 variables para realizar la superposición ponderada:

Para la asignación de pesos o porcentajes en el análisis de superposición, se consideraron 2 modelos de análisis distintos aplicables al área de estudio (Tabla 4):

1. Modelo A o Escenario A: Centrado en otorgar relevancia a varias variables, tanto a la población, variables estructurales y de mantención que son las más dinámicas y de microescala urbana.
2. Modelo B o Escenario B: Centrado en otorgar mayor relevancia a las variables de población y variables estructurales asociadas a las vías.

Variables Consideradas		(%) Modelo A	(%) Modelo B	Tipo de Variables
Población	Variable 7: Población Actualizada	20%	40%	Prioritarias y Estructurales
	Variable 6: Dificultad Estructural (IC)	20%	15%	
Evaluación de Variables	Variable 3: Estado de la Carpeta (Vía)	20%	5%	Mantención
	Variable 1: Estado de la Luminaria	10%	5%	
	Variable 2: Obstáculos Esporádicos	10%	10%	
	Variable 5: Presencia/Estado Señalética	10%	5%	Complementarias y de Gestión
	Variable 4: Interconectividad para Evacuar	10%	20%	
		100%	100%	

Tabla 4. Escenario y Ponderaciones
Fuente: Autoras, 2024.

Cabe señalar que las ponderaciones deberían ser asignadas por los tomadores de decisión, incorporando a actores en la microescala, expertos y actores que intervengan en las fases del ciclo del riesgo. El énfasis de la evaluación de las vías buscó aportar a los sistemas de evacuación por tsunami, considerando aspectos de multiescala, incluyendo variables de escala macro (infraestructuras a escala de ciudad), escalas intermedias (población y sectores) y microescalas (obstáculos en las vías).

De la superposición ponderada en las vías y del proceso de sistematización se obtuvo un modelo integrado de las vías (Figura 5), como un resultado territorial de los Modelos A y B, el cual recoge las vías de evacuación críticas resultantes. Este producto es útil para aplicar a distintos tipos de acciones, de gestión y de mantención en diferentes vías de evacuación (Modelo A) y, acciones más estructurales y centradas en las zonas densamente pobladas (Modelo B). Considerando ambos resultados, se genera el Modelo Integrado, de acuerdo con las decisiones de planificación que sean urgentes y viables, es decir, conteniendo un sistema de relaciones asociado a la gobernanza.

Desde el punto de vista de las áreas densamente pobladas (Figura 6), será necesario considerar la evacuación mixta y/o evacuación vertical, como plantea (Cienfuegos et al., 2014; Laclabere & Oliva, 2018), y para ello saber dónde aplicarla (sectores prioritarios).

Se concuerda con lo planteado por Williams et al., 2019; Suppasri et al. (2021) y Wang & Jia (2021), desde el concepto amplio de la resiliencia y su aspecto sistémico (Saja et al., 2021), en que existen infraestructuras críticas que pueden presentar interrupciones y dañar a otras infraestructuras en una emergencia por tsunami y afectar la velocidad de recuperación, como es el caso de la Ruta 5 y la línea férrea que intersectan a las 11 vías de evacuación analizadas.

Cabe señalar que el Modelo Integrado Territorial (Figura 6) es una expresión espacial y se vincula al Modelo Final de Variables Asociadas (Figura 7), y desde el punto de vista de la gestión, ambos se insertan en el ciclo de la Gestión de Riesgos de Desastres, enfatizando que el proceso de preparación y mitigación deben ser un continuum y buscar los mecanismos institucionales para que esta gestión sea efectiva. Scheer et al. (2012), en el marco genérico para la planificación de evacuación, destaca la permanente reevaluación y coherencia con el Eje 4 de la Política Nacional para la Reducción de Riesgos de Desastres (2020-2030) (Ministerio del Interior y Seguridad Pública, 2020).

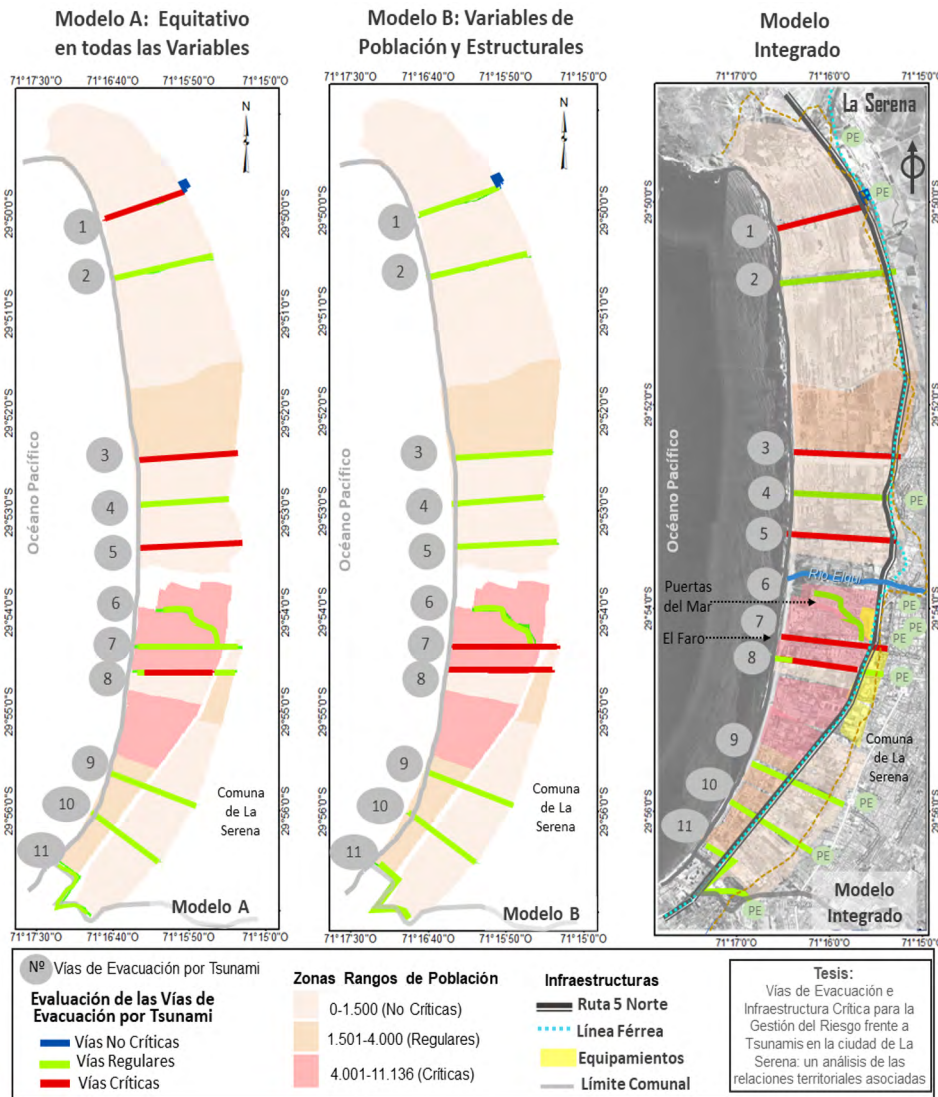


Figura 6. Modelos Territoriales de las Variables Asociadas a las Vías de Evacuación
Fuente: Autoras, 2024, en base a Villagrán (2022).

En la sistematización de variables y actores (Figura 7), se detectan ciertas dinámicas de convergencia en la planificación de evacuación, que puede significar un complemento a la autoridad y a profesionales involucrados en la emergencia a nivel local y también implicancias en escalas intermedias en la planificación urbana, ya sea de los ministerios y servicios desconcentrados, con efectos detonantes para una mejor gestión de riesgos de desastres integrada y multiescalar.

El modelo final de variables, muestra oportunidades para la gestión local y evaluación de los sistemas de evacuación, donde las variables asociadas a mantenimientos y las complementarias de gestión local, se puedan traducir en la elaboración de iniciativas concretas, enmarcadas en proyectos financiables por los organismos de la escala comunal/regional y aquellas variables estructurales, estén comprometidas en los instrumentos e instituciones de escala nacional. Por el contrario, si no se realizan evaluaciones de variables y revisión al sistema de evacuación, se incrementa la vulnerabilidad del sistema e impacto negativo en la gestión del riesgo a nivel local.

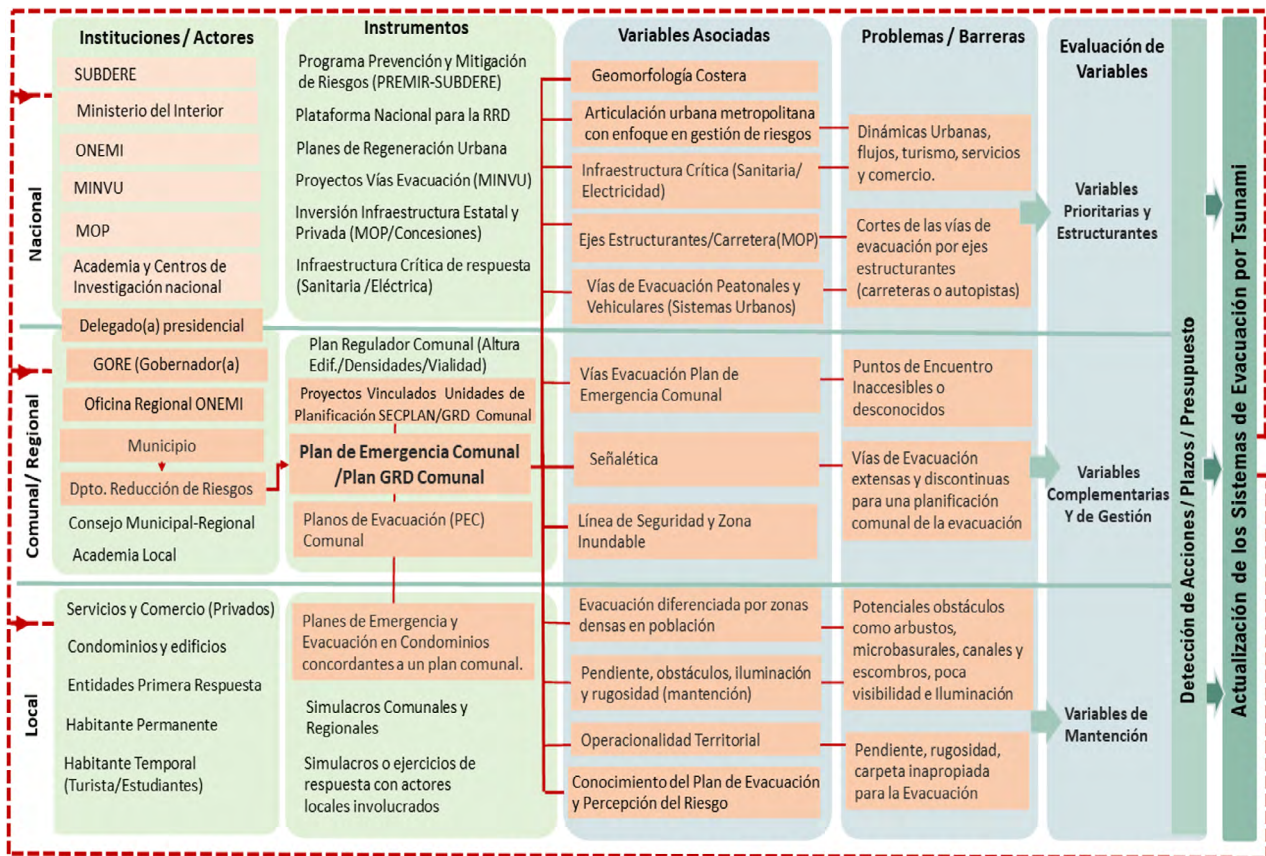


Figura 7. Modelo Final de Variables Asociadas y Principales Actores
Fuente: Autoras, 2024, en base a Villagrán (2022).

DISCUSIONES

Diversos aportes y metodologías aplicadas a la evacuación como la “Guía de referencia para sistemas de evacuación comunales por tsunamis” (MINVU et al., 2017), han permitido obtener una valiosa argumentación técnica para estimar, por ejemplo, el tiempo para la evacuación y la capacidad de las vías para las ciudades chilenas. Sin embargo, si bien son parámetros estimativos, resulta importante considerar otras variables, como las obstrucciones locales y dificultades estructurales.

Las vías analizadas en la ciudad de La Serena, se encuentran obstaculizadas por una carretera de doble calzada, es decir, las vías de evacuación se ven interrumpidas por cuatro pistas vehiculares, en la que se puede retardar entre 1 a 10 minutos adicionales, para poder continuar en una vía de evacuación y llegar a la zona de resguardo. En sintonía a lo planteado por Suppasri et al. (2021) y Wang & Jia (2021), desde el concepto amplio de la resiliencia y su aspecto sistémico (Saja et al., 2021), existen infraestructuras críticas que pueden presentar interrupciones e incluso dañar a otras infraestructuras en una emergencia por tsunami y afectar la velocidad de recuperación.

Desde el punto de vista predictivo e ingenieril, el sofisticado modelo de agentes utilizado para la evaluación de la evacuación, abordado por autores como Martínez et al. (2017) y León et al. (2018) coinciden en la existencia de complicaciones que dificultan la validación de las modelaciones por el grado de incertidumbres, como por ejemplo los aspectos socioculturales o cambios estacionales en la población costera. En este sentido, el poder analizar y reevaluar la planificación de la evacuación considerando nuevas dimensiones (Martínez et al., 2017), como la infraestructura crítica, las vías de evacuación y su estado actual en cuanto a características de microescala, puede aportar para mejorar el funcionamiento de la evacuación.

Considerando en este trabajo, diversas variables con enfoque espacial, se constata la complejidad para el diseño y ejecución de un plan de emergencia comunal con orientación integradora y en diversas escalas. Con relación a esto, tal como señala Cutter (2016), en sus indicadores de resiliencia ante desastres, plantea que existen variadas herramientas, y enfoques para la evaluación de la resiliencia, existiendo variables comunes, y reconoce que existen siempre

datos nuevos que se pueden incorporar, siendo el manejo del riesgo un proceso continuo de aprendizaje, destacando las herramientas analíticas de las ciencias espaciales en este esfuerzo de integración.

Por otra parte, la falta de mantención en las vías de evacuación, podrían propiciar obstrucciones naturales, como arbustos y vegetación costera característica de esta zona, y en consecuencia, resulta fundamental incorporar variables dinámicas como el análisis de las barreras u obstrucciones dentro de la planificación de la evacuación, en sintonía a lo planteado por Scheer et al., (2012), en el marco genérico para la planificación de la evacuación. En esta investigación se destaca el mantenimiento de rutas de escape, planteando que, los tomadores de decisión locales deben asegurarse, de mantener regularmente las componentes básicas de la evacuación en funcionamiento, evaluando el estado de la accesibilidad real y los cambios de la capacidad de las vías de evacuación.

Considerando las proyecciones de eventos sísmicos y tsunamigénicos severos, que podrían producirse en un futuro, afectando a las ciudades costeras de Chile, como al caso de estudio (Métois et al., 2013; Serrano et al., 2019). Antecedentes que conllevan a una examinación crítica, reevaluar los planes de evacuación ante tsunami y las múltiples amenazas, redefinir la línea de seguridad establecida en la cota 30 según las características costeras, los puntos de encuentros, los tiempos de evacuación, la planificación urbana y la infraestructura crítica para respuesta, entre otras variables.

Actualmente, si bien existen estudios que aportan con nuevos antecedentes en cuanto a la dinámica sísmica, y antecedentes acerca de los impactos del cambio climático en las costas del país (Winckler et al., 2021), sin embargo, estos nuevos resultados se encuentran poco aplicados en la política pública y en la definición de planes territoriales asociados a la mitigación del riesgo.

CONCLUSIONES

La infraestructura en la zona costera de La Serena, como la línea férrea de la Empresa Compañía Minera del Pacífico (CMP) y la carretera Ruta 5, que se ubican de forma paralela a la costa, obstaculizan a las once vías de evacuación analizadas en este estudio. Infraestructuras relevantes de escala regional y nacional, representan una de las principales barreras para la evacuación por tsunami, incluso este eje podría presentar intervenciones que complejizaría aún más el sistema de vías de evacuación por tsunami, con el proyecto de concesión de La Serena- Coquimbo.

En La Serena, se detecta que la variable Dificultad Estructural resulta determinante para las vías de evacuación, ya que no contribuye a los propósitos de estos corredores. Todas las vías analizadas presentan alguna dificultad estructural y grado de obstrucción para la evacuación, por lo tanto, la infraestructura crítica de primera respuesta no presenta un atributo positivo para la gestión de riesgos a nivel local.

Se logra determinar áreas críticas asociadas a las vías de evacuación en el Modelo Integrado (Figura 6), correspondiente al sector costero El Faro y sector Puertas del Mar, cercano a las vías de evacuación N°6, Puertas del Mar, N°7 Avenida Francisco de Aguirre y N°8, Amunategui, tramo urbano que contiene la mayor cantidad y densidad de población al año 2022. Además, estas zonas críticas presentan un alto dinamismo turístico, contiene equipamientos de comercio y educacional que aglomeran gran cantidad de personas; presenta una creciente urbanización en altura y además coincide, con las condiciones más críticas para la evacuación por tsunami según el análisis realizado. Por otra parte, estos sectores residenciales en La Serena han acogido una importante población migrante emplazada sobre todo en el sector Puertas del Mar.

El trabajo desarrollado permitió estimar la cantidad de población expuesta a tsunami, que bordearía los 58.290 habitantes, representando aproximadamente el 24,2% de la población comunal. Además, se determinaron las vías de evacuación prioritarias y las zonas críticas, logrando dar respuesta a la pregunta: dónde intervenir, para la preparación y mitigación en la gestión del riesgo de desastres en la ciudad de La Serena.

Los resultados que indican vías en una condición regular implican la necesidad de una vigilancia futura, sobre todo en los sectores en donde se proyecta un crecimiento y urbanización mayor futura, como por ejemplo en la vía N°2 en el sector Serena Golf.

Mediante la sistematización, se logró esquematizar las relaciones de variables territoriales asociadas a las vías de evacuación, variables asociadas al relieve, a la configuración de la población en la costa, al estado de situación de las vías y su mantención, obstáculos, y variables estructurales, logrando un modelo territorial y también de gestión institucional vinculado. Y con ello se constata la importancia de una continua evaluación en los sistemas de evacuación, integrando variables con un enfoque multidimensional y multiescalar.

La evaluación de las vías de evacuación es un esfuerzo integral, desde la metodología mixta (trabajo de campo y análisis espacial), para la obtención de modelos territoriales, con una mirada institucional en la evaluación a los sistemas de evacuación por tsunamis. Además, este método busca una mejora continua a la planificación de la evacuación, puede ser replicado fácilmente, perfectible y robustecido con diversos tipos de información, de acuerdo con las realidades de otras ciudades del país y en sistemas de evacuación ante tsunamis de otros países.

Como desafíos futuros, existen variables estructurales que implican soluciones complejas y de largo plazo para una gestión institucional articulada, como también aspectos de mantenimiento y coordinaciones en niveles regionales-locales, que podrían desarrollarse mediante proyectos y mecanismos presupuestarios coordinados, que podrían ser efectuados en un corto plazo para el aporte a la labor de los gobiernos locales en la fase de mitigación y en acciones para una mejor gestión de riesgos de desastres.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con la colaboración de profesionales de instituciones públicas ligadas a la Gestión de Riesgos de Desastres, como la Municipalidad de La Serena, la Unidad de Gestión de Riesgos de Desastres Comunal, y la Oficina Regional del Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) en la Región de Coquimbo en Chile, y también retribuir a la Beca de Magister para funcionarios del Sector Público ANID- PFCHA-2021-79210006.

REFERENCIAS

- Aguirre N., Olivares, R., Orellana M. (2018). Patrones de crecimiento urbano en la metropolización de sistemas urbanos intermedios. El caso de la conurbación La Serena - Coquimbo. En: *Libro de proceedings, CTV 2018. XII Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual. "Ciudades y Territorios Inteligentes"*. UNCuyo, Mendoza, 5-7 septiembre 2018. Barcelona: CPSV, 2018, p. 77-96.
- Álvarez, G., Quiroz, M., León, J., & Cienfuegos, R. (2018). Identification and classification of urban micro-vulnerabilities in tsunami evacuation routes for the city of Iquique, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(7), 2027-2039. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2027-2018>
- Banco Interamericano de Desarrollo [BID]. (2018). *Plan de Acción Área Metropolitana La Serena-Coquimbo en el marco de la metodología Ciudades Emergentes y Sostenibles (CES)*. BID.
- Castro, C.P. (2021). *Proyecto Riesgo Urbano: Evaluación y Preparación de la Emergencia desde un Enfoque Integral. Caso de Estudio ciudad de La Serena. Seminario Internacional Modelando el Riesgo Urbano en La Serena, una Herramienta para Respondedores*. USAID, Ilustre Municipalidad de La Serena & Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Chile.
- Castro, C.P. & Sarmiento, J. & Espinace, J. (2021). Gestión del Riesgo Participativa como medio hacia la Transformación Adaptativa de Comunidades y Territorios Vulnerables. Caso Caleta San Pedro, Región de Coquimbo, Chile. En: García Martul, D. (Ed.), *Ciências socialmente aplicáveis: Integrando saberes e abrindo caminhos, Vol. II* (pp.96-107). Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_3008214537
- Castro, C.P., Magallanes, V. & Soto, M.V. (2018). Riesgos siconaturales asociados a amenazas hidromorfológicas en la ciudad de Copiapó. En: Easton Vargas, G., Pérez Tello, S. & Aldunce, P. (Eds.), *Aluviones y resiliencia en Atacama: construyendo saberes sobre riesgos y desastres* (pp. 135-148). Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile. <https://doi.org/10.34720/jr4r-6j31>
- Cid Ortiz, G., Castro Correa, C.P. & Rugiero de Souza, V. (2012). Percepción del riesgo en relación con capacidades de autoprotección y autogestión, como elementos relevantes en la reducción de la vulnerabilidad en la ciudad de La Serena. *Revista INVI*, 27(75), 105-142. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582012000200004>
- Cienfuegos, R., Suarez, L., Aranguiz, R., González, G., González-Carrasco, J., Catalán, P., Dominguez, J., & Tomita, T. (2014). Reassessment of tsunami hazard in the city of Iquique, Chile after the Pisagua earthquake of April 2014. AGU Fall Meeting Resúmenes, NH13A-3727, 2014.

- Cutter, S.L. (2016). The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Natural Hazards*, 80(2), 741-758. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1993-2>
- Diario el Día. (2021, 16 de agosto). Más de 31 Mil habitantes en zonas de inundación. *Diario El Día*. <https://cndu.gob.cl/mas-de-31-mil-personas-habitan-en-zonas-de-riesgo-de-inundacion-por-tsunami/>
- Hidalgo, R., Arenas V., F. & Monsalve, R. (2009). La conurbación La Serena-Coquimbo: problemas y desafíos de su transformación metropolitana. En: Hidalgo, R., Mattos, C.A. de. & Arenas V., F. (Eds.), *Chile: del país urbano al país metropolitano* (pp. 161-184). Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Ito, E., Kawase, H., Matsushima, S., & Hatayama, M. (2020). Tsunami evacuation simulation considering road blockage by collapsed buildings evaluated from predicted strong ground motion. *Natural Hazards*, 101(3), 959-980. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03903-2>
- Laclabere, S., & Oliva, C. (2018). Arquitectura y emergencia: Sistema de evacuación vertical para Iquique, Chile. *Arquitecturas del Sur*, 36(54), 46-57.
- Lagos, M. & Cisternas, M. (2008). El nuevo riesgo de tsunami: considerando el peor escenario. *Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 12(270)(29). <https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-270/sn-270-29.htm>
- Leon, J. & March, A. (2016). An urban form response to disaster vulnerability: improving tsunami evacuation in Iquique, Chile. *Environment and Planning B*. 43(5), 826-847.
- León, J., Mokrani, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., & Femenías, C. (2018). Examining the role of urban form in supporting rapid and safe tsunami evacuations: A multi-scalar analysis in Viña del Mar, Chile. *Procedia Engineering*, 212, 629-636. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.081>
- León, J., Vicuña, M., Ogueda A., Guzmán S., Gubler A., Mokrani, C. (2021). From urban form analysis to metrics for enhancing tsunami evacuation: Lessons from twelve Chilean cities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102215. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102215>
- Ley N°21.364 (2021). Establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, Sustituye la oficina nacional de emergencia por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, y adecúa Normas que indica. Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Chile, 07 de Agosto de 2021.
- Martínez, C., Moris, R., Quense, J. (2017). Capítulo VIII Valoración de las áreas de riesgo por tsunami y potencial de evacuación: propuestas para la reducción del riesgo de desastres a escala local. En Irarrázaval, I., Piña, E., & Letelier, M. (Eds.), *Propuestas para Chile Concurso Políticas Públicas 2016* (pp. 243-278). C.I.P. - Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Martínez, C. Cienfuegos, R., Inzunza, S., Urrutia, A., Guerrero, N. (2020). Worstcase 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>
- Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., Maureira, E., Valderas-Bermejo, M.C., & Ortega, I. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3), 1283-1294. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt183>
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (2020). *Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres. Plan Estratégico Nacional. 2020-2030*. MISP.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo MINVU. (2017). Guía de referencia para sistemas comunales de evacuación por tsunami. *Serie Espacios Públicos Urbanos*, 6.
- Moris, R., Cienfuegos, R., Arenas, F., Gironás, J., Escauriaza, C., Ledezma, C., Heitmann, J., et al. (2010). *Estudio de riesgo de sismos y maremoto para comunas costeras de regiones de O'Higgins y del Maule*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Municipalidad de La Serena. (2020). *Plan Regulador Comunal Vigente. La Serena: Municipalidad de La Serena*. Municipalidad de La Serena. http://transparencia.laserena.cl/documentos/doc_65__21122020091456.pdf
- Municipalidad de La Serena. (2022). *Plan Comunal de Emergencias Comuna de La Serena (2018)*. Municipalidad de La Serena. <http://gestionderiesgos.laserena.cl/descargas/plan-comunal-2018.pdf>
- ONEMI. (2018). *Plano de Evacuación de Tsunami, IV Región de Coquimbo, Comuna de La Serena, Edición junio de 2018*. ONEMI. <https://www.onemi.gov.cl/wpcontent/uploads/2018/07/La-Serena.pdf>

- Ortíz Véliz, J., Castro Correa, C.P., & Escolano Utrilla, S. (2002). Procesos de reestructuración urbana y niveles de vulnerabilidad a amenazas naturales en una ciudad de tamaño medio: La Serena, Chile. *Investigaciones Geográficas*, (36), 17-42. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2002.27744>
- Paskoff, R. (1970). *Recherches Géomorphologiques dans le Chili Semi-aride*. Biscaye Frères, Bordeaux.
- Saja, A.M.A., Teo, M., Goonetilleke, A., & Ziyath, A.M. (2021). A Critical Review of Social Resilience Properties and Pathways in Disaster Management. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 790-804. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00378-y>
- Scheer, S. J., Varela, V., & Eftychidis, G. (2012). A generic framework for tsunami evacuation planning. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 79-91. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2011.12.001>
- Serrano, M.F., Medina, M., Mocanu, M., Muñoz, S.R., & Fernandez, R.F. (2019). Tsunami hazard evaluation in the coquimbo region using nonuniform slip distribution sources. *Seismological Research Letters*, 90(5), 1812-1819. <https://doi.org/10.1785/0220180395>
- Soto Bauerle, M., Sarricolea Espinoza, P., Sepúlveda, S., Rodolfi, G., Cabello, M. & Maerker, M. (2017). Assessment of hydro-geomorphological hazard potentials in the Chilean semiarid coastal range and its impacts on La Serena city, Coquimbo Region. *Natural Hazards*, 88, 431-452. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2873-8>
- Suppasri, A., Maly, E., Kitamura, M., Syamsidik, Pescaroli, G., Alexander, D., & Imamura, F. (2021). Cascading disasters triggered by tsunami hazards: A perspective for critical infrastructure resilience and disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102597>
- Villagrán Colina, C. (2022). Vías de evacuación e infraestructura crítica para la gestión del riesgo frente a tsunamis en la ciudad de La Serena: un análisis de las relaciones territoriales asociadas. Tesis de Magíster. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192520>
- Wang, Y., Sakate, K., Cienfuegos, R., Quiroz, M., & Navarrete, P. (2019). Far-field tsunami data assimilation for the 2015 Illapel earthquake. *Geophysical Journal International*, 219(1), 514-521. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz309>
- Wang, Y., Tsushima, H., Sakate, K., & Navarrete, P. (2021). Review on Recent Progress in Near-Field Tsunami Forecasting Using Offshore Tsunami Measurements: Source Inversion and Data Assimilation. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 5109-5128. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02910-z>
- Wang, Z., & Jia, G. (2021). A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment. *Natural Hazards*, 105(2), 2045-2071. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04389-8>
- Winckler, P., Martínez, C., Esparza, C., Agredano, R. & Contreras-López, M. (2021). Cambios Históricos y Proyecciones de Erosión en Playas de la Costa de Chile. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XXV Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*.
- Williams, J.H., Wilson, T.M., Horspool, N., Lane, E.M., Hughes, M.W., Davies, T., Le, L., & Scheele, F. (2019). Tsunami impact assessment: development of vulnerability matrix for critical infrastructure and application to Christchurch, New Zealand. *Natural Hazards*, 96(3), 1167-1211. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03603-6>