



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**SIMULACIÓN DE EVACUACIÓN POR
TSUNAMI A MICRO-ESCALA USANDO
MODELO BASADO EN AGENTES, CASO
DE ESTUDIO, IQUIQUE, CHILE.**

GONZALO ANTONIO ÁLVAREZ CASTILLO

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
RODRIGO CIENFUEGOS

Santiago de Chile, Diciembre 2017

© 2017, GONZALO ANTONIO ÁLVAREZ CASTILLO



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**SIMULACIÓN DE EVACUACIÓN POR
TSUNAMI A MICRO-ESCALA USANDO
MODELO BASADO EN AGENTES, CASO
DE ESTUDIO, IQUIQUE, CHILE.**

GONZALO ANTONIO ÁLVAREZ CASTILLO

Miembros del Comité:

RODRIGO CIENFUEGOS

JORGE GIRONÁS

JORGE LEÓN

ANDRÉS GUESALAGA

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Diciembre 2017

© 2017, GONZALO ANTONIO ÁLVAREZ CASTILLO

*A mi familia y a Claudia por su
infinito apoyo*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mis padres, Viviana y Humberto, por darme la oportunidad de recibir una buena educación. Jamás serán suficientes las palabras para expresar todo mi agradecimiento por lo que me han enseñado y apoyado durante toda mi vida, en especial durante mi etapa universitaria, cuando ya en una etapa más madura pude dimensionar su inmenso amor, gracias por apoyar cada una de mis ideas, sin duda vendrán muchos más proyectos y sé que en todos ellos estarán presentes para verme crecer. A mi abuela Elsa y a mis hermanos Rhomina y Diego por regalarme incontables momentos de alegría y distracción cuando más lo necesitaba, gracias por creer en mí. A Claudia por su amor y paciencia, por estar siempre para darme ánimos y un comfortable abrazo que me llena de energías.

Gracias también al Profesor Rodrigo Cienfuegos, por ser un excelente profesor supervisor y por presentarme un apasionante desafío como tema de tesis, muchas gracias por su disposición a ayudar y aportar con brillantes ideas para hacer de éste un mejor trabajo. Además agradecer al profesor Jorge León por sus sabios consejos e invaluable cooperación con la investigación y el planteamiento de nuevas formas de afrontar los problemas estudiados. De manera especial agradezco a los profesionales del Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) por su dedicación en el estudio de los desastres naturales y por mostrarme la importancia de transmitir el conocimiento a la comunidad, por el apoyo de sus investigadores y financiamiento entregado para este estudio. Finalmente agradecer a la Ilustre Municipalidad de Iquique (IMI) y a la Dirección Regional de la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) Tarapacá, por la información suministrada para el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Lecciones aprendidas de tsunamis recientes	1
1.2. El entorno urbano y su importancia en la evacuación	2
1.3. El estudio de la evacuación	3
2. CONTEXTO DE SISMOS Y TSUNAMIS EN CHILE	5
2.1. Riesgo de tsunami en Chile	5
2.2. Plan de respuesta a emergencias y experiencias anteriores	6
2.3. Zona de estudio	7
3. METODOLOGÍA	9
3.1. Micro-vulnerabilidades urbanas en las vías de evacuación	9
3.2. Simulación de tsunami	10
3.2.1. Configuración y validación del modelo numérico	11
3.2.2. Escenarios de tsunami	14
3.3. Modelación de la evacuación	17
3.3.1. Revisión de trabajos previos usando modelos basados en agentes	18
3.3.2. Características del modelo basado en agentes	18
3.3.3. Pertinencia del modelo de evacuación	24
3.4. Análisis de sensibilidad	26

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. Escenarios de evacuación	28
4.2. Estimación de fatalidades	30
5. CONCLUSIONES	35
ANEXO A. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE MICRO-VULNERABILIDADES	38
A.1. Introducción	38
A.2. Brecha en la planificación de evacuación por tsunami: Conexión entre la macro y micro escala urbana	40
A.3. Amenaza de tsunami en Iquique	42
A.4. Metodología	44
A.4.1. Trabajo de campo	45
A.4.2. Análisis de los datos	47
A.4.3. Nivel de obstrucción de las vías de evacuación	49
A.5. Resultados y discusión	51
A.6. Conclusiones	55
BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Zona de estudio.	6
3.1. Índices de fricción.	10
3.2. Grillas de simulación numérica.	12
3.3. Señales registradas y modeladas del tsunami de 2014.	13
3.4. Mapa de tiempos de arribo de las ondas de tsunami	16
3.5. Diagrama de flujo del modelo de evacuación.	21
3.6. Distribución de población en la zona modelada.	23
3.7. Validación del modelo de evacuación.	25
4.1. Curvas de evacuación para cada escenario modelado.	28
4.2. Diferencia de personas evacuadas producto de la presencia de obstáculos.	30
4.3. Modelo de evacuación por tsunami generado.	31
4.4. Diagrama de flujo de estimación de fatalidades.	32
A.1. Trabajo de campo.	47
A.2. Micro-vulnerabilidades.	48
A.3. Evacuación preventiva.	52
A.4. Mapa de índices de fricción.	53

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Conservación de velocidad en micro-vulnerabilidades.	21
4.1. Estimación de posibles fatalidades, escenario M_w 8.4	33
4.2. Estimación de posibles fatalidades, escenario M_w 9.0	33
A.1. Clasificación de las micro-vulnerabilidades respecto su origen.	49

RESUMEN

La ocurrencia de grandes terremotos y tsunamis durante las últimas décadas ha enfatizado la importancia del diseño e implementación de medidas de mitigación del riesgo de desastres. Resguardar a la población a través de una evacuación eficaz, es una de las mejores alternativas para minimizar la pérdidas de vidas humanas frente a un evento de tsunami. Por esta razón, garantizar el correcto estado de las vías de evacuación es clave para asegurar un adecuado desplazamiento de las personas hacia la zona segura.

Este estudio evalúa cómo la presencia de micro-vulnerabilidades urbanas que dificultan la circulación peatonal, puede resultar perjudicial en el desempeño de los procesos de evacuación. La metodología de esta investigación fue implementada en la ciudad de Iquique, altamente expuesta a tsunamis. En este sitio se llevó a cabo un detallado análisis de las vías de escape mediante un diagnóstico en terreno, el cual reveló una fuerte presencia de micro-vulnerabilidades urbanas. La influencia de este tipo de elementos en el retraso de los procesos de evacuación es cuantificada mediante una modelación a micro-escala basada en agentes, capaz de emular la dinámica y el comportamiento de la población bajo diferentes escenarios. Adicionalmente, la estimación del número de personas alcanzadas por un tsunami es realizada mediante la integración de la modelación de evacuación con la simulación de la inundación por tsunamis a alta resolución temporal y espacial.

Los resultados de las simulaciones evidencian un importante retraso de los procesos de evacuación al considerar la presencia de micro-vulnerabilidades. A pesar de lo anterior, el tiempo de inicio de la evacuación resultó ser el factor que más incidió en el número de personas alcanzadas, donde una evacuación inmediata luego del sismo permitiría una fuerte disminución de fatalidades.

Palabras Claves: Simulación de tsunamis, Evacuación, Modelo Basado en Agentes, Forma urbana, Micro-vulnerabilidades

ABSTRACT

Over the last decades, the occurrence of devastating earthquakes and their ensuing tsunamis, has highlighted the relevance of designing and implementing mitigation measures to minimize their impacts and reduce risks. In the case of tsunami hazards, a prompt evacuation is one of the best alternatives to prevent the loss of human lives. For this reason, maintaining adequate service levels for evacuation routes is very important to ensure an efficient displacement of pedestrians to safe zones.

The present study evaluates the potential impact of urban micro-vulnerabilities that may hinder the pedestrian circulation, on the performance of evacuation processes. The research methodology was implemented in the city of Iquique, a Chilean tsunami prone city. In this city, a detailed analysis of the escape routes is carried out through field work, revealing a high presence of urban micro-vulnerabilities. The influence of this kind of elements in the delay of evacuation processes is quantified through a micro-scale agents based model (ABM), able to emulate the population dynamics and behavior under different scenarios. Additionally, the estimation of the number of evacuees that may be caught by the tsunami is conducted by combining results from the ABM with simulations of tsunami inundation at high temporal and spatial resolution.

The results show an important delay of the evacuation process when micro-vulnerabilities are present. Nevertheless, the analysis of modeled scenarios, show that the time when the evacuation starts is the parameter that has larger influence in the number of potential casualties; indeed, a prompt evacuation just after the earthquake would significantly reduce the number of casualties.

Keywords: Tsunami simulation, Evacuation, Agents Based Model, Urban form, Micro-vulnerabilities

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Lecciones aprendidas de tsunamis recientes

Durante las últimas décadas, tsunamis tremendamente mortíferos han dejado miles de muertos en localidades costeras. El mayor de ellos fue el tsunami ocurrido tras el terremoto del Océano Índico M_w 9.0 en 2004. Se estima que más de 200.000 personas murieron producto del tsunami, que llegó a la costa de Sumatra aproximadamente 30 minutos después del terremoto (Tsuji et al., 2006; Satake et al., 2006). Las principales causas que determinaron el desastre fueron la inesperada ocurrencia de un terremoto gigante en la zona, la falta de un sistema de alerta temprana y la nula preparación y educación frente a este tipo de riesgo de desastre. Tras este catastrófico evento, la sismología y la ciencia de tsunamis tuvo un gran desarrollo. Producto de estos avances actualmente se cuenta con métodos de estimación en tiempo real de los parámetros de terremotos y su potencial tsunamigénico, nuevos sistemas de observaciones de ondas de tsunami tanto en aguas profundas como en la costa y modelos más precisos para representar la fuente del tsunami y su propagación. Estos avances han permitido implementar una serie de iniciativas en las áreas afectadas y en países con alta exposición a tsunamis, que incluyen: sistemas de alerta temprana, mapas de la amenaza, instalación de parlantes para la emisión de mensajes de alerta, colocación de señalización indicando rutas de evacuación y construcción de infraestructura dura como grandes rompeolas, especialmente para proteger instalaciones críticas (Satake, 2014; Shuto y Fujima, 2009).

Aún así, durante el Gran Tsunami del Este de Japón M_w 9.0 en 2011, cuya alarma fue emitida 3 minutos después del terremoto, las altura de las ondas de tsunami fueron mayores a las esperadas. El diseño de la infraestructura de protección ante tsunamis fue sobrepasado, muchas fueron destruidas y no fueron capaces de detener el tsunami. Las olas continuaron su avance alcanzando a cerca de 19.000 personas sin poder evitar el desastre. La falla de las defensas estructurales fueron un recordatorio de que éstas no son suficientes para proteger a la población expuesta a este tipo de amenazas. Por esta razón, medidas blandas como la

educación y concientización son muy importantes para promover una rápida evacuación hacia zonas seguras (Suppasri et al., 2013).

Anterior al desastre de Japón, el terremoto y tsunami chileno del Maule M_w 8.8 en 2010 significó la muerte de 525 personas, de las cuales 156 son atribuidas al tsunami (Huerta, 2011). Desafortunadamente la alarma de tsunami no fue emitida oportunamente por las autoridades locales antes de la llegada del tsunami. Sin embargo la cantidad de muertes fue minimizada por la pronta auto-evacuación realizada por los residentes de localidades costeras, gracias a su conocimiento respecto a eventos pasados (Fritz et al., 2011). El terremoto de 2010 fue el primero de 3 fuertes terremotos en Chile en menos de 6 años, la serie es completada por el terremoto M_w 8.2 del 1 de Abril de 2014 en Iquique (Catalán et al., 2015; Tomita et al., 2016) y el terremoto M_w 8.3 del 16 de Septiembre de 2015 en Illapel (Aránguiz et al., 2016; Contreras-López et al., 2016). Los cuales a pesar de su gran magnitud sólo ocasionaron unas pocas muertes, produciendo principalmente daños en puertos, localidades costeras y caletas de pescadores.

1.2. El entorno urbano y su importancia en la evacuación

El riesgo comúnmente es definido por la interacción de la amenaza con las variables de exposición y vulnerabilidad (Kron, 2013). Manejar amenazas como terremotos y tsunamis no es posible, por lo que la única manera de mitigar el riesgo es tomando acciones para reducir la vulnerabilidad y exposición. Evitar la pérdida de vidas humanas es el principal objetivo en la mitigación del riesgo, a este respecto la evacuación ha demostrado ser la medida más efectiva para mantener a la población segura (Shuto, 2005; Suppasri et al., 2013). Lo anterior, especialmente en países donde medidas duras como infraestructura de protección no son ampliamente adoptadas debido a los altos costos y largos tiempos requeridos para su construcción. La inversión en planes de educación y planificación, junto a mejoras en la infraestructura urbana son iniciativas vitales para garantizar que los procesos de evacuación sean desarrollados con éxito (Scheer et al., 2012; Esteban et al., 2013).

El entorno urbano es clave frente a la ocurrencia de eventos inesperados, provee espacios para la gestión de emergencias, movilidad para continuar las actividades diarias de una ciudad y permite comenzar los procesos de recuperación de las zonas afectadas, sin embargo también puede contribuir a la vulnerabilidad de sus habitantes. El estudio de Ciborowski (1982) menciona que un apropiado diseño urbano tiene la capacidad de disminuir la vulnerabilidad y afectar en el comportamiento y actitud de las personas durante eventos como terremotos. En particular el entorno de las vías de evacuación, que corresponden al medio de movilización de la población en busca de refugio, son susceptibles al incremento de la vulnerabilidad. Los trabajos de León y March (2016) y Reyes y Miura (2016) plantean la necesidad de realizar un análisis detallado de estos espacios públicos que son utilizados durante los procesos de evacuación. Frente a esta problemática, se implementa una metodología de identificación de micro-vulnerabilidades en las vías de evacuación, evidenciando la presencia de estos elementos a nivel de experiencia peatonal que aumentan la vulnerabilidad urbana y que son capaces de afectar negativamente el desplazamiento de los evacuados durante su escape, la cual es detallada en el anexo A.

1.3. El estudio de la evacuación

Estudiar el comportamiento de la población durante una evacuación es un reto complejo, la observación y medición de estos procesos generalmente sólo es posible en instancias como simulacros, sin embargo, detener las actividades normales de una ciudad para su realización es algo que no puede hacerse con regularidad. Aunque la importancia de los simulacros en la preparación y concientización de la población es innegable, éstos no permiten generar modificaciones para analizar una mayor cantidad de variables como se busca en la experimentación científica. Bajo este escenario surge la necesidad de emular el comportamiento de los evacuados a través de herramientas de modelación computacional. Los modelos de evacuación han sido ampliamente desarrollados durante las últimas décadas y han sido utilizados en una serie de aplicaciones como la dinámica de multitudes, movimiento peatonal y el comportamiento humano durante emergencias (Tavares, 2009). Factores que determinan el actuar de las personas durante una evacuación como la elección

de la ruta a seguir, la dinámica del desplazamiento y la toma de decisiones durante una evacuación, son difíciles de representar. La modelación de la evacuación busca acercarse lo más posible a la reproducción de estos procesos y permite guiar las decisiones de diseñadores y legisladores (Gwynne et al., 1999). Como también evaluar medidas y mejoras en la planificación urbana y la preparación frente a posibles evacuaciones con la finalidad de mitigar el riesgo de muerte producto de la ocurrencia de tsunamis.

Dentro de las múltiples funcionalidades que tiene la modelación de evacuación, la posibilidad de evaluar la interacción de los evacuados con el entorno construido abre la oportunidad de analizar el estado de la ciudad y poner a prueba cambios en la forma urbana. El presente trabajo busca hacer un aporte en este sentido, mediante la modelación de la evacuación a micro-escala integrada a simulaciones de inundación por tsunami de alta resolución, se evalúa cómo afecta el entorno de las vías de evacuación en estos procesos. El estudio fue realizado en el contexto de la ciudad costera de Iquique en Chile, recientemente afectada por un tsunami en 2014.

En las siguientes secciones se presenta, primero, evidencias que plantean la existencia de un alto riesgo sísmico en la zona de estudio. Segundo, los métodos empleados y las herramientas computacionales utilizadas en la modelación de los procesos de evacuación por tsunami. Tercero, los resultados obtenidos, seguido de una breve discusión de éstos. Y finalmente, conclusiones en base a parámetros resultado como tiempos de llegada a la zona segura y estimación de posibles muertes por alcance del tsunami, exponiendo a su vez recomendaciones al respecto.

2. CONTEXTO DE SISMOS Y TSUNAMIS EN CHILE

2.1. Riesgo de tsunami en Chile

La fosa oceánica de Perú-Chile es conocida por ser la zona de convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Esta zona ha estado constantemente bajo estudio debido a la ocurrencia de una gran cantidad de terremotos, aquellos de mayor magnitud, han generado destructivos y mortíferos tsunamis en las costas al sur del océano pacífico. En Chile, los mayores terremotos de los últimos siglos que se tiene registro corresponden al gran terremoto de Valdivia en 1960 M_w 9.5, seguido por los terremotos de 1868 en Arica y 1877 en Iquique, ambos de magnitud cercana a 8.8. (Lomnitz, 2004; Bilek, 2010). Recientemente el territorio chileno ha sido afectado por tres grandes terremotos $M_w > 8$ (Maule 2010 M_w 8.8, Iquique 2014 M_w 8.2, Illapel 2015 M_w 8.4), causando la preocupación de las autoridades y enfocando los esfuerzos en la mitigación del riesgo tanto de terremotos como tsunamis. Una especial atención ha tenido el norte grande Chile (ubicado desde la región de Arica hasta el sur de la ciudad de Antofagasta, figura 2.1) producto de la existencia de una brecha sísmica, región a lo largo del límite entre placas tectónicas que no ha experimentado grandes terremotos en más de 30 años (McCann et al., 1979). Desde los últimos grandes eventos en el norte de Chile (1868 y 1877), se ha generado una acumulación de deformación elástica con un alto potencial sísmico (Comte y Pardo, 1991; Métois et al., 2013; Schurr et al., 2014). Durante este tiempo, esta zona ha registrado actividad sísmica menor, donde destacan los terremotos de 1967 M_w 7.4 y 2007 M_w 7.7 en las cercanías de la ciudad de Tocopilla, pero que representan sólo una pequeña fracción de la deformación acumulada (Delouis et al., 2009). El mayor terremoto ocurrido en la brecha sísmica del norte de Chile es el reciente terremoto de 2014 M_w 8.2 en Iquique, el cual generó un tsunami menor que dañó infraestructura costera sin dejar muertos. Se estima que la energía liberada durante este terremoto corresponde alrededor de un 20% del total de energía acumulada desde 1877 (Lay et al., 2014; Aránguiz et al., 2015). Lo que permite asegurar que aún existe una alta probabilidad de ocurrencia de un gran terremoto de subducción en el futuro, en las cercanías de la zona de ruptura del año 2014 (Hayes et al., 2014).

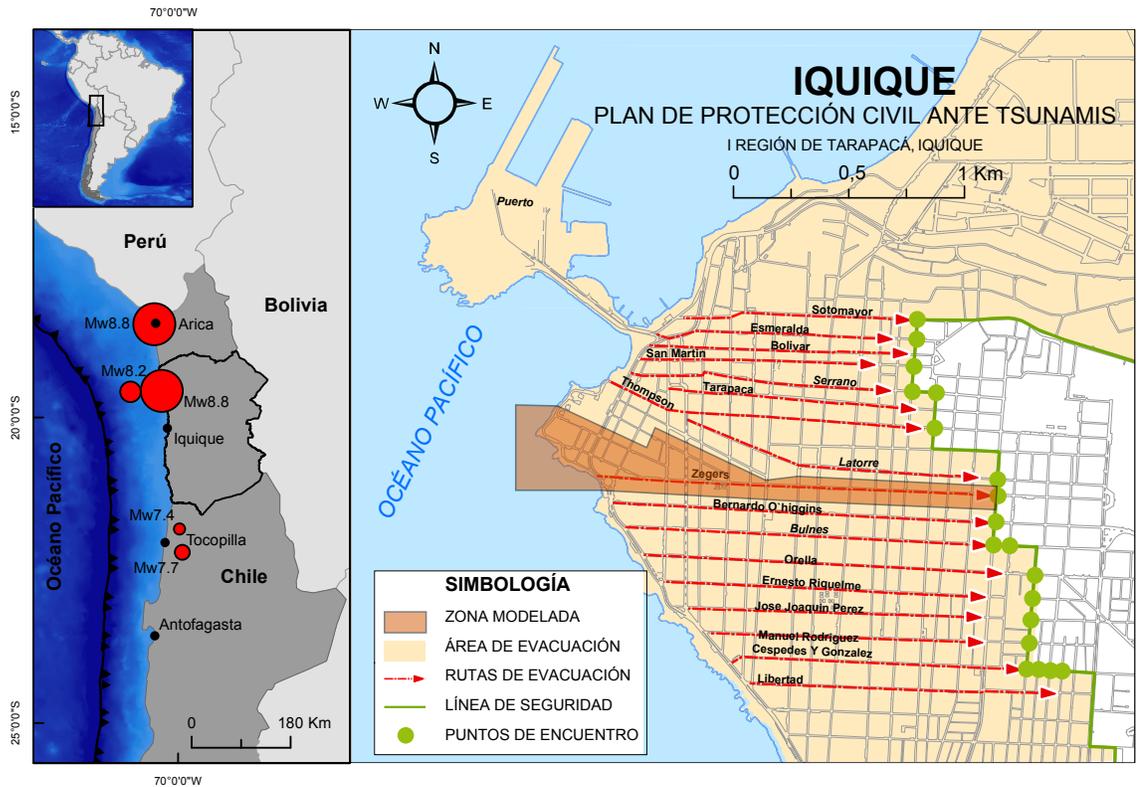


FIGURA 2.1. A la izquierda, ubicación geográfica de la ciudad de Iquique, los círculos rojos representan los mayores sismos registrados en la zona norte de Chile (Epícentros basados en los registros del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile y Servicio Geológico de los Estados Unidos). A la derecha, vías de evacuación correspondientes al centro de Iquique y la zona específica de modelación (modificado de IMI y ONEMI (2013)).

2.2. Plan de respuesta a emergencias y experiencias anteriores

Chile, debido a su ubicación y a la gran extensión de su costa ha experimentado numerosos terremotos y sus consecuentes tsunamis. Lomnitz (2004) plantea que Chile es tal vez la región más sísmica del mundo, con la posible excepción de Japón. Debido a lo anterior, una cultura sísmica ha estado en desarrollo en el país sobre todo a causa del recuerdo del gran desastre ocurrido tras el terremoto de 1960.

Durante el terremoto de 2010 a pesar de la falla en el sistema de alarma de tsunami, la mayoría de las personas evacuaron inmediatamente hacia zonas en altura, alertados por pescadores y autoridades locales, quienes contaban con un conocimiento histórico de la

ocurrencia de tsunamis. No obstante, algunas personas esperaron la llegada de la primera ola de tsunami para escapar (Esteban et al., 2013). A pesar de lo anterior, y gracias a la conciencia de tsunamis en el país, el saldo final de muertes fue baja comparada a otros eventos de magnitud similar como el terremoto y posterior tsunami M_w 7.7 en las islas Mentawai (Satake et al., 2013). La conciencia de tsunamis fue reforzada tras el tsunami de 2010, las autoridades invirtieron en educación, la colocación de señalización en vías de evacuación, mejoras en los mapas de inundación, realización de simulacros y en las zonas más afectadas, en la reconstrucción del borde costero incluyendo infraestructura de protección (Khew et al., 2015).

Medidas como las mencionadas anteriormente y la mejora del sistema de alerta temprana permitieron comunicar a tiempo la alerta de tsunami luego de los terremotos de los años 2014 y 2015 y que se produjeran sólo unas pocas víctimas. Tomita et al. (2016) destaca la efectividad de los simulacros previos al tsunami de Iquique en 2014 en cuanto a la identificación de zonas seguras y rutas de evacuación más cercanas. Sin embargo, la falta de iluminación de calles producto de fallas en el suministro eléctrico tras el terremoto y el uso de automóviles para evacuar, a pesar de la recomendación de evacuar a pie, generó accidentes y bloqueo de las vías de evacuación en 2014 (León y March, 2016).

2.3. Zona de estudio

La zona a estudiar corresponde a la zona céntrica de Iquique, ciudad costera ubicada al norte de Chile (20.53° S, 70.18° W), su territorio corresponde a una angosta franja de no más de 3 km de oeste a este, cuya pendiente creciente finaliza en un sistema montañoso. Iquique posee una intensa actividad industrial y comercial, debido en gran parte a la presencia de uno de los puertos más importantes del país, empleado para el transporte de bienes y recursos provenientes de la minería. Dentro de sus atractivos se encuentra una de las zonas comerciales libre de impuestos más grande de Sudamérica, construcciones históricas, la belleza natural de sus playas y el clima templado todo el año. La ciudad ha experimentado un gran crecimiento cercano a un 70 %, a diferencia de la media nacional de un 30 % entre los años 1993 y 2003 (Figuroa y Fuentes, 2009). Según los resultados del último censo

de población, un total de 184.953 personas residen en la ciudad (INE, 2012). El rápido crecimiento de las ciudades costeras como Iquique ha generado un aumento la exposición de sus habitantes y bienes frente a amenazas como tsunamis y un consecuente incremento en la vulnerabilidad y riesgo de inundación (Neumann et al., 2015; Kron, 2013; Jongman et al., 2012).

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN Y HERRAMIENTAS DE MODELACIÓN

3.1. Micro-vulnerabilidades urbanas en las vías de evacuación

Durante una evacuación, las vías de escape hacia zonas en altura son determinantes para un adecuado desarrollo de estos procesos. Un correcto trazado de las vías de evacuación asegura que la trayectoria de desplazamiento hacia las zonas seguras sea la más corta; en Iquique la distribución ortogonal de sus calles es un elemento positivo que garantiza rutas de evacuación redundantes y prácticamente rectas (ver figura 2.1). A pesar de lo anterior, las altas tasas de población y motorización, y la gran cantidad de actividades de tipo comercial, turística, industrial y educacional hacen de la zona de estudio, un lugar altamente expuesto a la amenaza de tsunamis. Los altos índices de ocupación dan lugar a una serie de problemas en cuanto a la disponibilidad de espacios en las vías de evacuación, que idealmente debieran permanecer despejados y libres de obstáculos con el fin de evitar que se disminuya su capacidad de diseño (Scheer et al., 2012). La situación actual de la ciudad estudiada es totalmente opuesta a lo planteado, pues existe evidencia de importantes problemas de vulnerabilidad urbana frente a tsunamis (León y March, 2016; Walker, 2013).

El presente estudio incorpora un diagnóstico de la ciudad, donde se documenta la presencia de elementos a escala peatonal en las vías de evacuación que incrementan la vulnerabilidad urbana y que afectan negativamente el desplazamiento de las personas, los cuales son cuantificados a través de la definición de un índice de fricción (ver anexo A). Estas “micro-vulnerabilidades” tienen su origen en el mal uso, mala mantención y problemas en el diseño de las rutas destinadas para la evacuación. Iquique debido a la gran cantidad de autos en circulación, dentro del 3 % superior a nivel nacional (INE, 2015), tiene como principal problema la ocupación de espacios públicos para estacionamiento reduciendo considerablemente la capacidad de las vías. Mientras que otros elementos como la utilización de la acera para extender el servicio de restaurantes y el uso de espacios públicos por comercio informal tienen una menor presencia pero entorpecen de igual manera

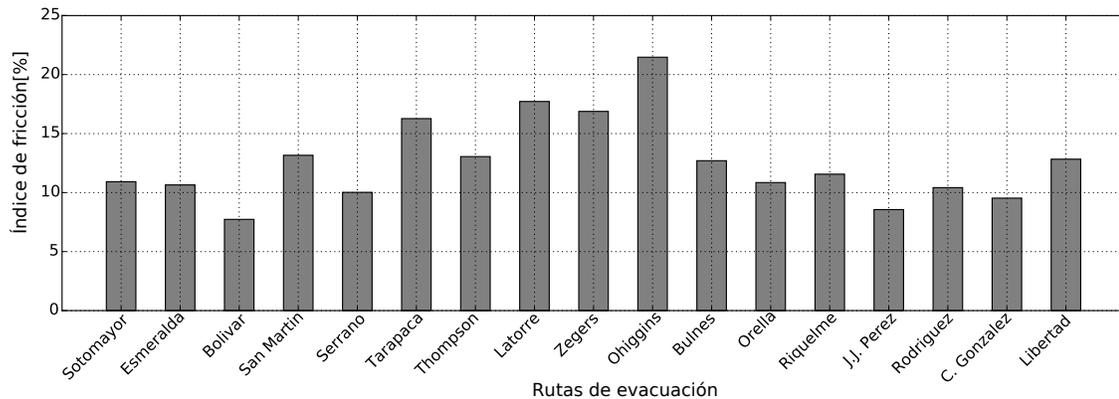


FIGURA 3.1. Índices de fricción de la zona central de Iquique.

la evacuación. Los análisis de escenarios de evacuación por tsunami desarrollados en esta investigación incorporan los resultados respecto a la presencia de micro-vulnerabilidades urbanas en las vías de evacuación de Iquique, buscando representar de manera realista los procesos de evacuación considerando la situación actual de la ciudad. La figura 3.1 muestra los resultados del diagnóstico de las vías de evacuación de Iquique en función de su índice de fricción (ver anexo A), donde las rutas cuyo entorno urbano se encuentra peor preparado para una eventual evacuación son las calles O'Higgins, Latorre y Zegers. La primera, incorpora trabajos de mejoramiento vial al momento del estudio, por lo que sólo representa una situación temporal; la segunda, al no comenzar en el borde costero, su análisis no es prioritario; por lo que la calle Zegers es identificada como la vía de evacuación en peores condiciones, indicando la necesidad de realizar un análisis detallado de la evacuación e inundación a lo largo de esta ruta.

3.2. Simulación de tsunami

La mejor manera de representar posibles escenarios de la amenaza de tsunami es a través de la simulación computacional; los tsunamis generalmente son modelados como ondas largas, debido a que la escala de su longitud de onda es mucho mayor que la escala de la profundidad del medio en el que se propaga. El conjunto de ecuaciones que permite

resolver la hidrodinámica de estos fenómenos son denominadas ecuaciones de aguas someras. La condición inicial en la simulación de tsunamis es definida por los desplazamientos generados durante un terremoto, que producen deformaciones en el fondo marino, junto con toda la columna de agua sobre este, y puede ser estimada a partir de la distribución de desplazamientos de la fuente sísmica utilizando la teoría de dislocación elástica de Okada (Okada, 1985).

El actual protocolo de emergencia ante tsunamis en Chile emplea resultados de la simulación de tsunamis, el organismo encargado de esta tarea es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), quienes determinan la zona de seguridad en ciudades costeras del territorio nacional. Para Iquique, se define como peor escenario el tsunami producido por el terremoto de 1877, y la zona de seguridad corresponde a terrenos elevados sobre la línea de inundación calculada para este evento.

En este estudio, se trabajó con simulaciones numéricas de escenarios hipotéticos de tsunami realizadas a través del modelo de código abierto GeoClaw (Clawpack Development Team, 2015). El software GeoClaw implementa un método de alta resolución de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones no lineales de aguas someras, un set de ecuaciones diferenciales parciales que permite obtener profundidades $h(x, y, t)$ y velocidades de flujo promediadas en la profundidad, $u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$ (Berger et al., 2011). El modelo utiliza mallas de refinamiento adaptativo espacial y temporal para alcanzar grillas de mayor resolución en la zona de interés, que para efectos de este estudio corresponde a la zona inundable de la ciudad de Iquique.

3.2.1. Configuración y validación del modelo numérico

Los escenarios de inundación por tsunami son modelados utilizando cuatro grillas anidadas en coordenadas planas, con el fin de representar la evolución del tsunami desde la zona de generación hasta la inundación de la ciudad (ver figura 3.2). La grilla 1 corresponde a la topografía del Norte Grande de Chile y batimetría del Océano Pacífico, generada a partir de GEBCO (2014), que cubre la zona de generación del tsunami con una resolución gruesa de 900 m. Las grilla 2 y 3, de 180 y 30 m respectivamente, obtenidas desde cartas

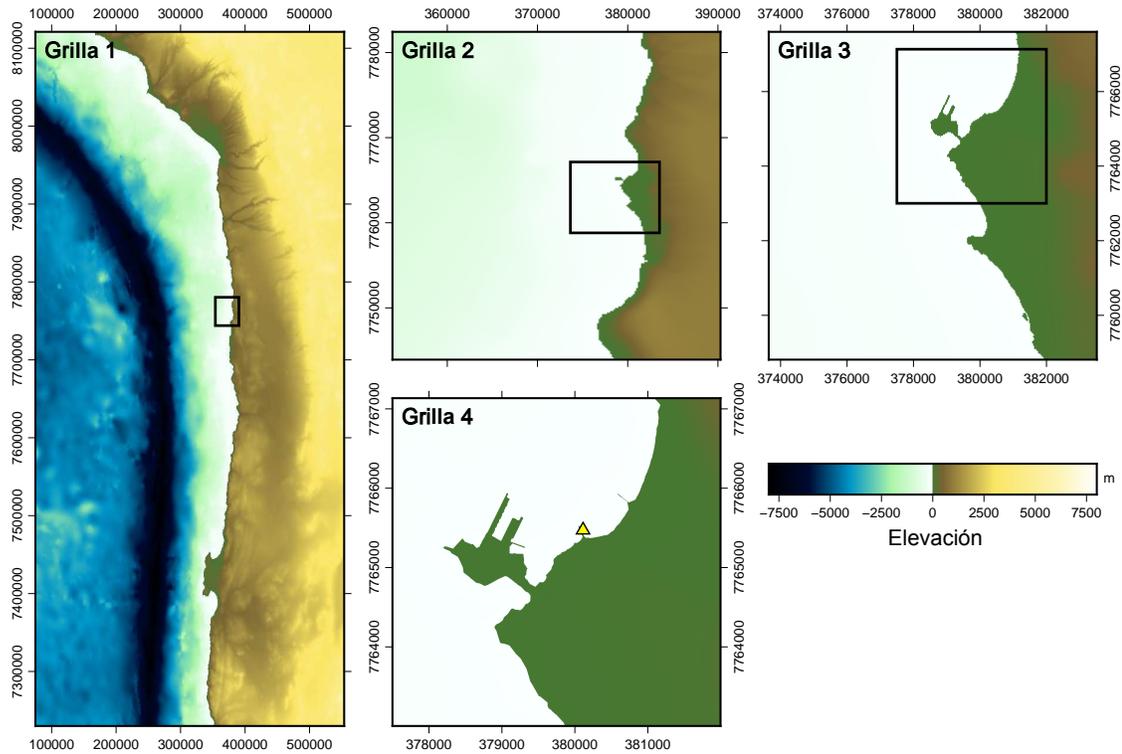


FIGURA 3.2. Grillas anidadas utilizadas en la simulación numérica. El triángulo amarillo indica la ubicación del mareógrafo del puerto de Iquique.

náuticas pertenecientes al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), permiten abarcar la propagación del tsunami hacia la costa chilena utilizando una mayor resolución. Mientras que la grilla 4 contiene información de topografía LIDAR de la ciudad de Iquique con una resolución de 2 m y permite modelar la inundación de la ciudad con un alto nivel de detalle, permitiendo representar la influencia de la infraestructura en la propagación en tierra de los tsunamis (Baba et al., 2014).

Con el fin de validar la configuración del modelo de tsunami para la simulación de escenarios propuestos, se simula el tsunami producido por el terremoto de Iquique en 2014, utilizando un modelo de desplazamientos obtenidos en base a registros de tsunamis en boyas (An et al., 2014) y un modelo que complementa los registros con mediciones de inversión tectónica y datos GPS (Gusman et al., 2015). Cuyos resultados son comparados

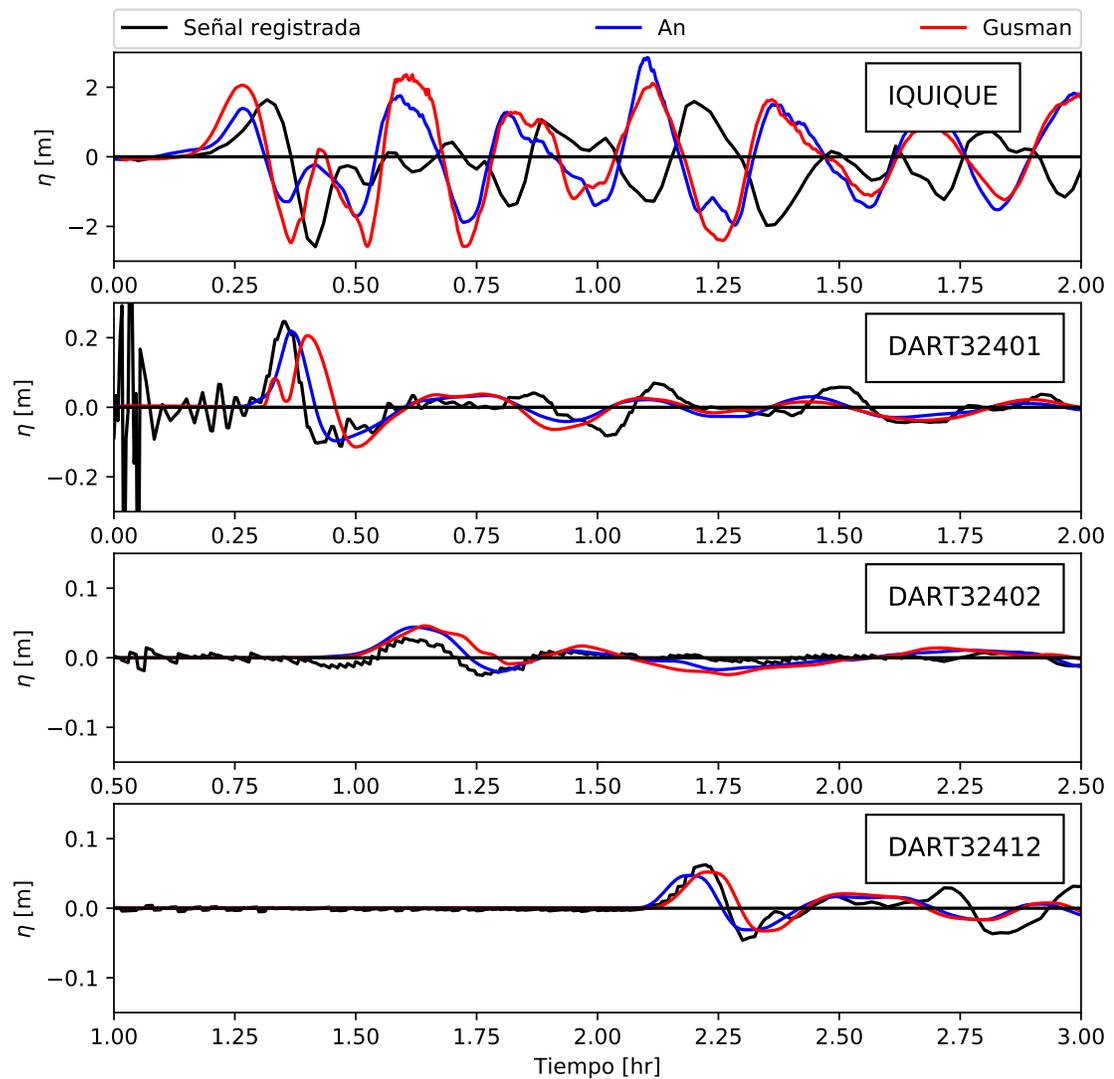


FIGURA 3.3. Señal del tsunami de 2014 registrada por el mareógrafo de Iquique y boyas DART junto a series de tiempo generadas por la simulación a partir de modelos de falla para el terremoto de 2014.

con la señal de tsunami registrada por el mareógrafo de Iquique y boyas en aguas profundas del programa DART (UNESCO/IOC, 2014; NOAA, 2014).

En general las series de tiempo generadas a partir de los modelos de falla de An et al. (2014) y Gusman et al. (2015) tienen una buena concordancia con los registros de tsunami

(ver figura 3.3). Se observa una arribo más temprano de las ondas de tsunami en las simulaciones que en las observaciones del mareógrafo de Iquique, de igual manera a lo detectado por Catalán et al. (2015), Gusman et al. (2015) y Aránguiz et al. (2015), presentando además algunos desfases y diferencias en los peak de las series de tiempo, desigualdades que incrementan para tiempos mayores y que también son observadas por los autores antes mencionados. Por otra parte los resultados en aguas profundas tienen un muy buen ajuste con los registros de las boyas DART más cercanas al norte de Chile, debido a que los procesos físicos en aguas oceánicas son mejor representados por el modelo de tsunamis y la presencia de fenómenos no lineales más complejos es menos relevante comparada con lo que ocurre en la cercanía de bahías, hechos consistentes con los resultados en campo lejano de las simulaciones realizadas por An et al. (2014), Gusman et al. (2015) y Catalán et al. (2015). En base a lo anterior, es posible asegurar que la configuración del modelo permite realizar una reproducción adecuada de las ondas producidas durante un tsunami en Iquique con el fin de analizar los alcances de la inundación y la posible pérdida de vidas en los habitantes. Las principales diferencias entre las series de tiempo de la desnivelación del mar se deben a la falta de precisión en la batimetría empleada, aproximaciones empleadas en la modelación numérica y problemas relacionados con los métodos de inversión que dan origen a los modelos de falla del terremoto generador.

3.2.2. Escenarios de tsunami

Varias investigaciones se han realizado con el fin de estimar el potencial sísmico en diferentes zonas propensas a terremotos. Moreno et al. (2012) han demostrado que los modelos de acoplamiento intersísmico (ISC) tienen una buena correlación con la distribución de desplazamientos cosísmicos, lo que permite generar posibles futuros escenarios a partir de la acumulación de deformación en periodos de ausencia de terremotos. Dependiendo de los parámetros de la fuente del terremoto, la condición inicial de deformación superficie del mar puede verse afectada y con ello impactar en las características del consecuente tsunami. Utilizando como criterio los parámetros de altura de olas y tiempo de arribo del tsunami,

se analizaron dos posibles escenarios de terremoto cuyo tsunami podría tener desastrosas consecuencias en el norte de Chile. Un peor escenario posible, un terremoto M_w 9.0 (Cienfuegos et al., 2014) basado en los análisis de ISC de Chlieh et al. (2011) y Yagi et al. (2014); y por otra parte un terremoto M_w 8.4 (Ortega y Catalán, 2017), parte de una numerosa muestra de escenarios estocásticos basados en el trabajo de Métois et al. (2013) y seleccionado por el nivel de inundación que genera y su temprano tiempo de arribo. Ambos escenarios han sido propuestos como posibles terremotos previo a la ocurrencia del terremoto de Iquique en 2014, por lo que la acumulación de deformación elástica en esta zona también es considerada en los modelos de desplazamiento. De manera conservadora se realizaron además, simulaciones de tsunami de los escenarios mencionados considerando un nivel de marea alta (0.76 m) al momento de la ocurrencia del terremoto generador.

En la figura 3.4 se presentan los resultados de tiempos de arribo de las ondas de tsunami en la costa de Iquique para los escenarios seleccionados. La alta resolución topográfica (2 m) utilizada en la simulación permite tener una buena representación del efecto de la infraestructura en los flujos entrantes por las calles de la ciudad y apreciar de manera más realista cómo podría producirse la inundación en la ciudad de Iquique, frente a posibles futuros escenarios. Se aprecia que para el escenario M_w 9.0 las primeras cuadras de la ciudad son inundadas en menos de 15 minutos, mientras que para el escenario M_w 8.4 esta zona es inundada en 20 minutos. Para ambos escenarios se observa que las zonas más expuestas a la inundación son el puerto de Iquique, producto de su ubicación en territorio marino, lugar que originalmente correspondía a una isla que posteriormente fue unida al continente por el hombre; y la zona ubicada al norte (Zona Franca de Iquique, ZOFRI), que corresponde a un terreno de baja altura que alberga la mayor actividad comercial de la ciudad, cuyo caso es evaluado en los estudios de Arikawa y Oie (2015) y Aránguiz et al. (2015). El análisis a desarrollar se centra en una de las vías de evacuación más afectadas por los escenarios de inundación presentados anteriormente, calle Zegers, donde la intrusión del tsunami tarda entre 15 y 20 minutos en alcanzar alrededor de seis cuadras; desafortunadamente, además esta es la ruta de mayor preocupación, debido a la gran presencia de micro-vulnerabilidades urbanas. En base a lo anterior, se realiza una modelación detallada de diferentes escenarios

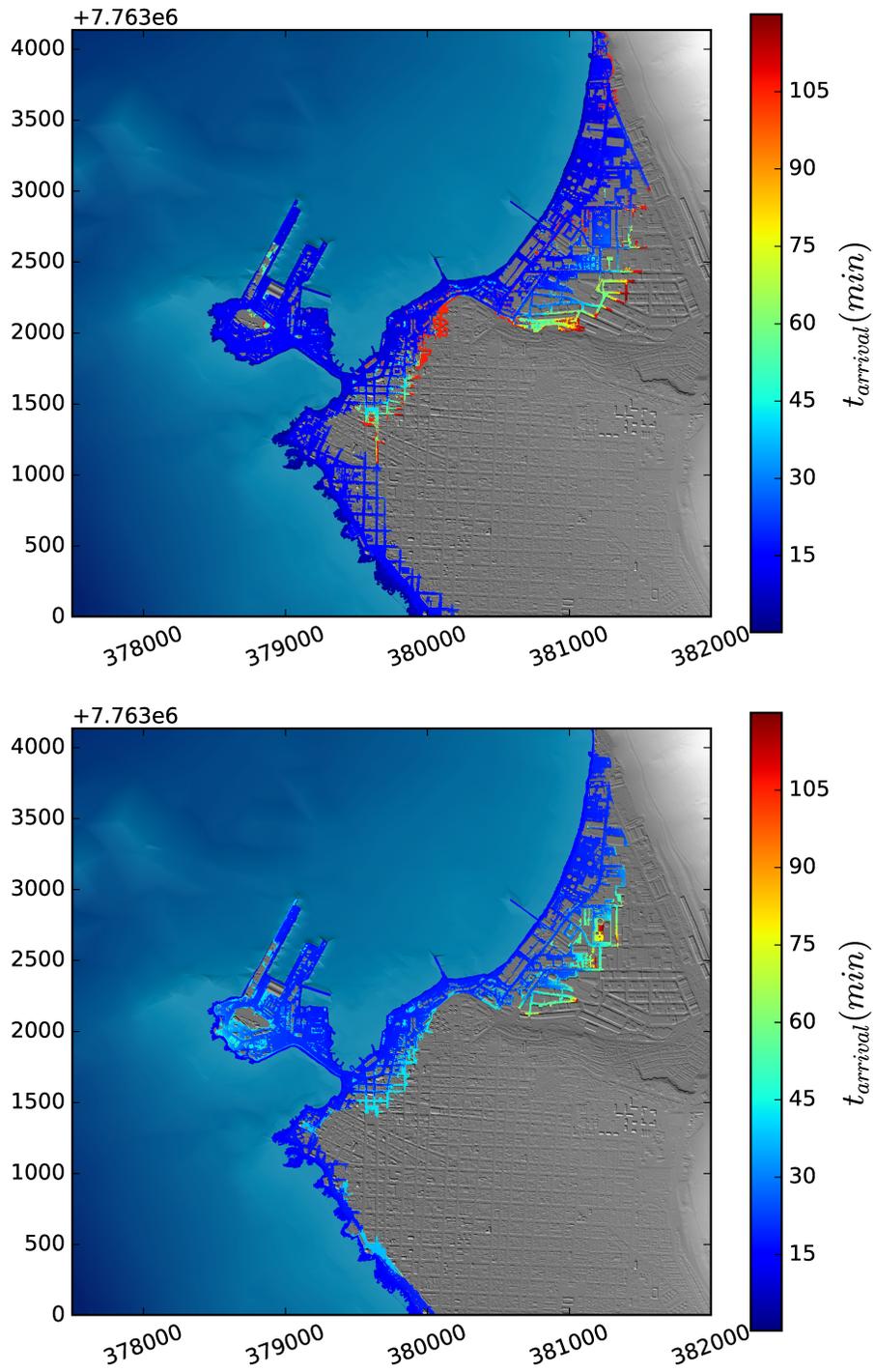


FIGURA 3.4. Mapa de tiempos de arribo de las ondas de tsunami para los escenarios modelados en la zona de estudio. Arriba, escenario M_w 9.0. Abajo, escenario M_w 8.4.

de evacuación, considerando como zona de modelación, toda las calles que alimentan la vía de evacuación Zegers (ver figura 2.1).

3.3. Modelación de la evacuación

El proceso de evacuación ha sido estudiado en distintas disciplinas y con distintos enfoques. Una de las metodologías más utilizadas corresponde a los modelos de menor costo-distancia (LCD), los cuales consideran principalmente las características del entorno como la rugosidad del suelo dependiendo del material (e.g., asfalto, tierra) junto con las rapidez medias de las personas de acuerdo al rango etario. Un análisis comparativo entre varios de estos modelos puede encontrarse en Wood y Schmidlein (2012). En ingeniería de transporte, en tanto, la evacuación se ha estudiado como un problema de flujo en redes. Por ejemplo Ndiaye et al. (2014) desarrolla un modelo de arcos y nodos con pérdidas, representando de esta manera la gente que puede haber sido afectada por algún evento externo como caída de material o un tsunami.

Sin embargo, tanto los modelos LCD como los de flujo corresponden a modelos macroscópicos de evacuación, que no permiten capturar el comportamiento de cada persona. Bajo este requerimiento uno de los métodos más utilizados en distintas disciplinas como economía, epidemiología, ciencias sociales y evacuación es el modelo basados en agentes (ABM). Esta herramienta computacional permite simular estructuras sociales bajo un diseño “bottom-up”, i.e. las individualidades son recreadas en detalle para luego formar componentes mayores mediante la representación de las personas como entidades virtuales capaces de organizarse bajo ciertas reglas de comportamiento que gobiernan la interacción entre los agentes y de éstos con su entorno (Xiaoping et al., 2009). Los modelos basados en agentes tienen un costo computacional mayor que otros modelos de evacuación, pero permiten reproducir comportamientos únicos, característica propia de grupos humanos heterogéneos; como se aprecia en el estudio de Mas et al. (2012), quien considera reglas estocásticas para la decisión que toma cada agente respecto a la ruta a escoger para evacuar a una zona segura.

3.3.1. Revisión de trabajos previos usando modelos basados en agentes

Es posible encontrar varios trabajos de evacuación que utilicen ABM. En el caso de evacuación de edificios, Z. Liu et al. (2015) y Poulos et al. (2017) conectan el daño de estructuras tras un terremoto con la evacuación de las personas, mientras que Braun et al. (2005) incursionan en la evacuación producto de la propagación de fuego o humo considerando la interacción de agentes con obstáculos. Para el caso de ciudades, en tanto, Mas et al. (2012) acopla una simulación del tsunami de 2011 en Tohoku con la evacuación. En este caso, cada agente debe decidir cuándo comenzar a evacuar y en qué medio lo hará, controlando la velocidad en función de la densidad. Un enfoque similar es el que sigue Mordvintsev et al. (2014) para una evacuación en St. Petersburg, Rusia, estimando el número de fatalidades producto de una inundación. Por otra parte, Wang et al. (2016) evalúa el efecto que tienen las distintas decisiones como el modo de transporte en la tasa de mortalidad ante un tsunami en la zona de subducción de Cascadia.

En particular, para la zona de estudio en la que se enfoca este trabajo, León y March (2016) comparan las distintas rutas de evacuación integrando un modelo de agentes con sistemas de información geográfica (GIS). Los escenarios simulados consideran cambios en distintas propiedades de los agentes, tales como el tiempo de inicio de la evacuación o la ruta seleccionada, además de la distribución de la población (diurna o vespertina). De manera similar, Solís y Gazmuri (2017) contrastan mediciones de simulacro de evacuación con un modelo de evacuación basado en agentes en la ciudad de Iquique. En ambos estudios los arcos de la red utilizada representan cada una de las calles de la ciudad con un largo característico y una capacidad determinada, donde el movimiento de los agentes es regulado a través de una densidad máxima alrededor de ellos. Sin embargo, no consideran un enfoque detallado de la interacción entre los agentes y con elementos que pueden generar dificultades al proceso evacuación.

3.3.2. Características del modelo basado en agentes

La principal característica del modelo basado en agentes utilizado en este trabajo corresponde al movimiento de cada uno de los agentes. A diferencia de muchos trabajos que

consideran métodos como el de fuerza social (Helbing et al., 2000; Parisi y Dorso, 2005; Lin et al., 2006), o reducen la rapidez de los agentes de acuerdo a la densidad de personas (Mas et al., 2012; León y March, 2016; Solís y Gazmuri, 2017), el modelo utilizado se basa en un algoritmo de evasión de colisiones (Van den Berg et al., 2011). El método resuelve un problema de optimización que calcula la velocidad de cada agente más cercana posible a su velocidad deseada y que al mismo tiempo garantiza que el agente se moverá sin chocar con otro agente o algún obstáculo. La ventaja de este método es que captura de manera natural los problemas de congestión que se pueden presentar durante una evacuación, dado que ningún agente puede usar el mismo espacio físico que otro en el mismo instante de tiempo, a diferencia del método de las fuerzas sociales que no pone restricción a este problema. Para ello se define un espacio personal alrededor de cada agente de 45 cm que no puede superponerse con otro agente u elemento del entorno (Poulos y de la Llera, 2014).

La elección de la ruta de evacuación es otro de los aspectos fundamentales al momento de desarrollar un modelo de evacuación. Distintas metodologías se han propuesto en la literatura, tales como la ruta más corta (algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959), algoritmo de búsqueda A* (Hart et al., 1968) y Artificial Potential Field methods (Khatib, 1990)), la ruta más simple (Duckham y Kulik, 2003), o la ruta de menor riesgo (Vanclooster et al., 2014). Cualquiera de estas metodologías es aplicable al modelo de evacuación, sin embargo el algoritmo escogido fue Dijkstra (Dijkstra, 1959).

La geometría del entorno de desplazamiento de los agentes es incorporada a partir de la planimetría de la zona de estudio en coordenadas planas, que incluye los límites de edificación junto a información de la demografía local a nivel de manzanas desde la costa hasta la zona de seguridad definida para el área de estudio.

La velocidad deseada de cada agente es calculada mediante un muestreo utilizando una distribución Weibull de media 1.34 m/s (parámetro de forma 10.14 y parámetro de escala 1.41), distribución calibrada por Rinne et al. (2010), cuyo valor medio es consistente con la revisión bibliográfica realizada por Daamen y Hoogendoorn (2007).

El impacto de la pendiente en la variación de la velocidad de desplazamiento peatonal es calculado mediante la función de Tobler (Tobler, 1993), quien plantea, en base a datos empíricos, que los valores de velocidad de caminata varían con la pendiente de manera exponencial 3.1. Estudios previos avalan la utilización de la función de Tobler en modelos de evacuación para cuantificar de manera continua la reducción o aumento de velocidad en función de la pendiente (Wood y Schmidtlein, 2012; Fraser et al., 2014; Solís y Gazmuri, 2017). Para este estudio, la reducción de velocidad por pendiente corresponde al cociente entre la velocidad calculada para una determinada pendiente y la velocidad asociada a un plano horizontal, factor que es aplicado a la velocidad deseada (pre-establecida) de los agentes al momento de circular por las calles, donde cada calle tiene un valor de pendiente calculada en base a la topografía de alta resolución disponible.

$$Walking_{speed} = 6 \exp \left(-3,5 \left| \frac{dh}{dx} + 0,5 \right| \right) \quad (3.1)$$

Con el fin de lograr una mejor representación del entorno urbano, una serie de elementos geométricos que representan las micro-vulnerabilidades presentes en la vía de evacuación estudiada son agregados a la modelación basándose en los datos de campo del estado de las vías de evacuación por tsunami en la ciudad de Iquique (ver anexo A). El efecto en el desplazamiento de los agentes al enfrentarse a estas obstrucciones es resuelto mediante la utilización del parámetro Speed Conservation Value (SCV), definido a partir de los estudios de Schmidtlein y Wood (2015) y Fujiyama y Tyler (2014); el cual corresponde al porcentaje de la máxima velocidad que puede presentar un peatón en una determinada superficie (Wood y Schmidtlein, 2012). Para efectos de este estudio es empleado como un factor que disminuye la velocidad predeterminada del agente al momento de circular sobre el área de la obstrucción. La Tabla 3.1 muestra los valores de SCV para las micro-vulnerabilidades de la zona a modelar, donde la mayor parte de estas son del tipo bloqueos SCV=0, áreas en las que los agentes no pueden transitar, por lo que deben rodear este tipo de obstrucciones presentes en el área de modelación. Mientras que la presencia de micro-vulnerabilidades que no interfieren en el tránsito son evaluadas mediante una disminución en la velocidad

TABLA 3.1. Conservación de velocidad en micro-vulnerabilidades presentes en las vías de evacuación.

Speed Conservation Value (<i>SCV</i>)			
Bloqueos (0)		Cambios de nivel (0.5501)	Materialidad (0.9091)
Angostamientos	Kioskos	Desniveles	Áreas verdes
Árboles	Letreros	Escaleras	Veredas quebrada
Autos	Muros	Tapas de cámara	
Asientos	Negocios		
Barreras	Objetos		
Basureros	Paraderos		
Cajas de electricidad	Postes		
Cercos	Restaurantes		
Escombros	Separadores de acera		
Esculturas	Subterráneos		
Estacionamientos	Teléfonos públicos		
Estaciones de bencina	Trabajos		
Grifos			

Basado en Fujiyama y Tyler (2014); Wood y Schmidlein (2012); Schmidlein y Wood (2015)

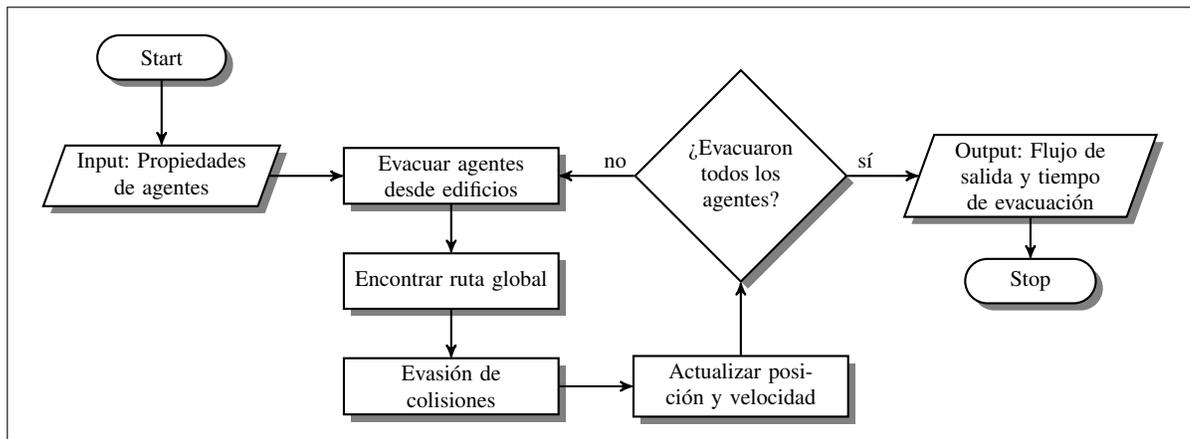


FIGURA 3.5. Diagrama de flujo del modelo de evacuación.

de circulación con valores de $SCV=0.5501$ para elementos del tipo cambios de nivel y de $SCV=0.9091$ para superficies rugosas, siendo estas últimas las que tienen una menor influencia en la reducción de velocidad.

La configuración de la simulación evacuación contempla variables que definen distintos escenarios de evacuación: i) la incorporación o retiro de micro-vulnerabilidades urbanas en el entorno de simulación, ii) la distribución espacial de los agentes y iii) el tiempo de inicio de la evacuación de los agentes.

Para cuantificar el efecto de la presencia de micro-vulnerabilidades urbanas en los tiempos de evacuación se realizan simulaciones que incorporan los elementos detectados en el trabajo de campo (ver anexo A) en el espacio destinado al desplazamiento de los agentes, para posteriormente realizar comparaciones con simulaciones de agentes libres de obstrucciones.

3.3.2.1. Distribución espacial de la población

Debido a que la distribución espacial de la población, consecuentemente la exposición a la amenaza de tsunami, es dependiente del tiempo en grandes centros urbanos (Freire et al., 2013), la distribución espacial de los agentes fue definida para dos escenarios, un escenario nocturno y uno diurno. El caso nocturno fue modelado utilizando la información relacionada al último censo de población realizado en Chile (INE, 2012), cuya información, desagregada a nivel de manzanas, indica la ocupación en edificaciones de uso habitacional. Por otra parte, la distribución de la población en el escenario diurno fue derivada de la matriz origen-destino de la ciudad de Iquique (SECTRA, 2010), estudio a partir del cual es posible obtener las variaciones porcentuales en la distribución de la población durante el periodo de mayor movilidad en la ciudad (hora punta en la mañana) mediante la comparación de la distribución de la población en las zonas de origen de los viajes con respecto a sus zonas de destino. Sin embargo, las áreas de origen-destino corresponden a macro-manzanas, por lo que para lograr una representación a escala de manzanas, se aplican los incrementos o disminuciones producto de los viajes a la sectorización del censo, una fuente de información más detallada y actualizada. Considerando además una mayor carga de ocupación en infraestructura no habitacional, en base a las limitaciones de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (MINVU, 2016) e información referente a la ocupación de establecimientos educacionales del Ministerio de Educación. La figura 3.6 muestra la variación en la distribución de la población para los escenarios modelados. De esta manera, los escenarios de población en la zona de estudio quedan definidos, para el escenario nocturno con 3171 personas y para el escenario diurno con 4597 personas, donde

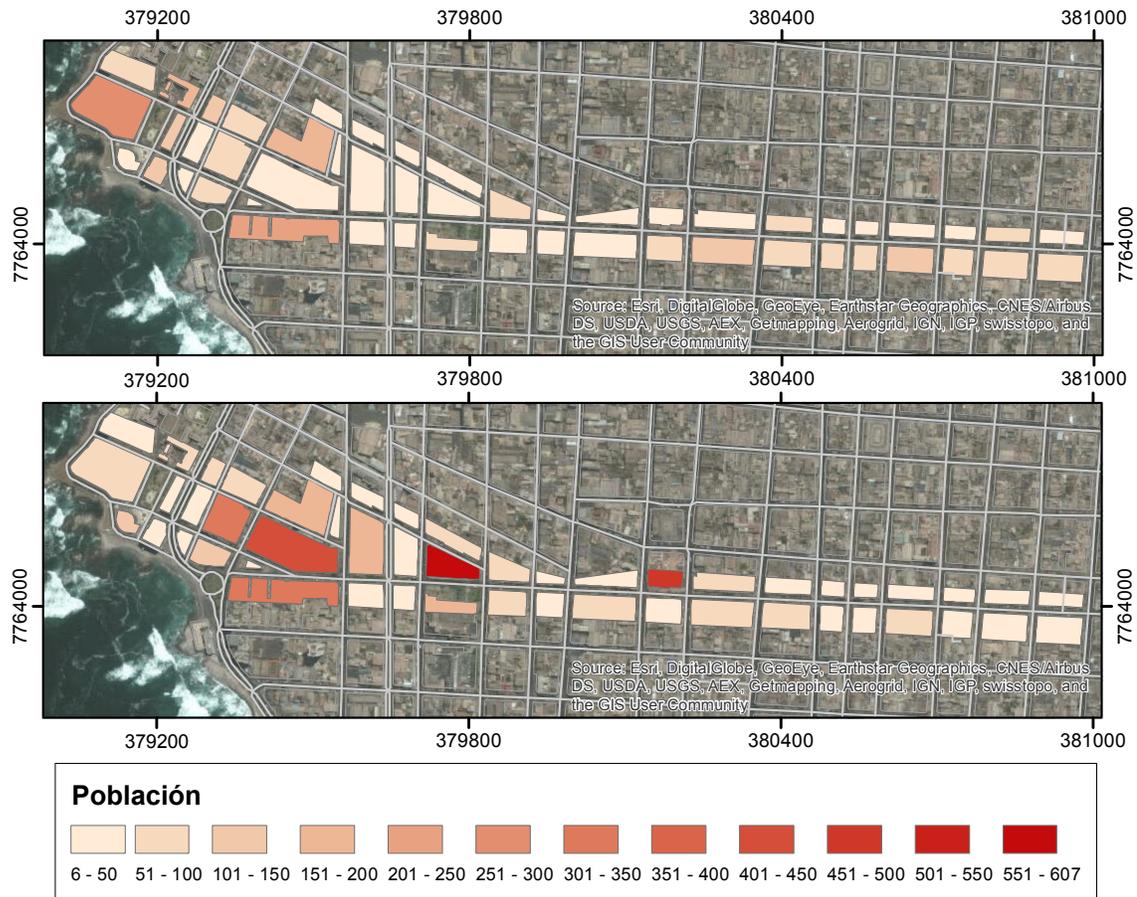


FIGURA 3.6. Distribución de población en la zona modelada. Arriba, población escenario nocturno. Abajo, población escenario diurno.

este último presenta una mayor concentración de población en el centro del área de estudio, a diferencia del escenario nocturno en el cual la mayor ocupación es observada en los extremos, cercanías de la costa y zonas de mayor altura.

3.3.2.2. Tiempo de inicio de la evacuación

Con el fin de reproducir la variabilidad en la toma de decisiones con respecto al tiempo de incorporación de las personas al proceso de evacuación, se recurre a estudios previos referentes a cargas de tráfico en las redes de evacuación frente a eventos de gran envergadura, donde se plantea el uso de curvas sigmoideas para representar la distribución de los tiempos de incorporación a la evacuación de las personas (Tweedie et al., 1986; Lindell y

Prater, 2007; Mas et al., 2011), la aproximación empleada en este estudio y ampliamente utilizada en la literatura para la modelación de evacuación por tsunami (Mas et al., 2012; León y March, 2014, 2016; Solís y Gazmuri, 2017) es la distribución de probabilidad de Rayleigh, ecuación 3.2 .

$$F(t) = 1 - \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.2)$$

$$\mu = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (3.3)$$

Donde σ corresponde al parámetro de escala de la distribución Rayleigh y es calculado en función de la media mediante la ecuación 3.3

3.3.3. Pertinencia del modelo de evacuación

El 8 de Agosto de 2013, la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) realizó un simulacro de terremoto y tsunami en la zona norte de Chile, cuyo objetivo fue evaluar el plan de evacuación del borde costero y la respuesta de la población frente eventos de sismo y tsunami. Algunas de las variables consideradas en el análisis fueron: el comportamiento y organización de la comunidad, tiempos de evacuación y condiciones de seguridad de los inmuebles, vías de evacuación y zona de seguridad ante tsunamis. En donde la Región de Tarapacá, cuya capital regional es Iquique, contó con la participación de 76.000 personas (Walker, 2013). Con el fin de adquirir una mejor información respecto a los procesos de evacuación, el Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN) registró el desarrollo del simulacro a través del conteo de la llegada de las personas a los puntos de encuentro cada 30 segundos en las vías de evacuación designadas, cuyos valores promedio fueron utilizadas anteriormente en la validación del modelo de evacuación a macro-escala desarrollado por Solís y Gazmuri (2017).

Empleando las mediciones del flujo de personas llegando a la zona de seguridad, se construyen curvas de tiempo de evacuación para realizar una comparación con la curva

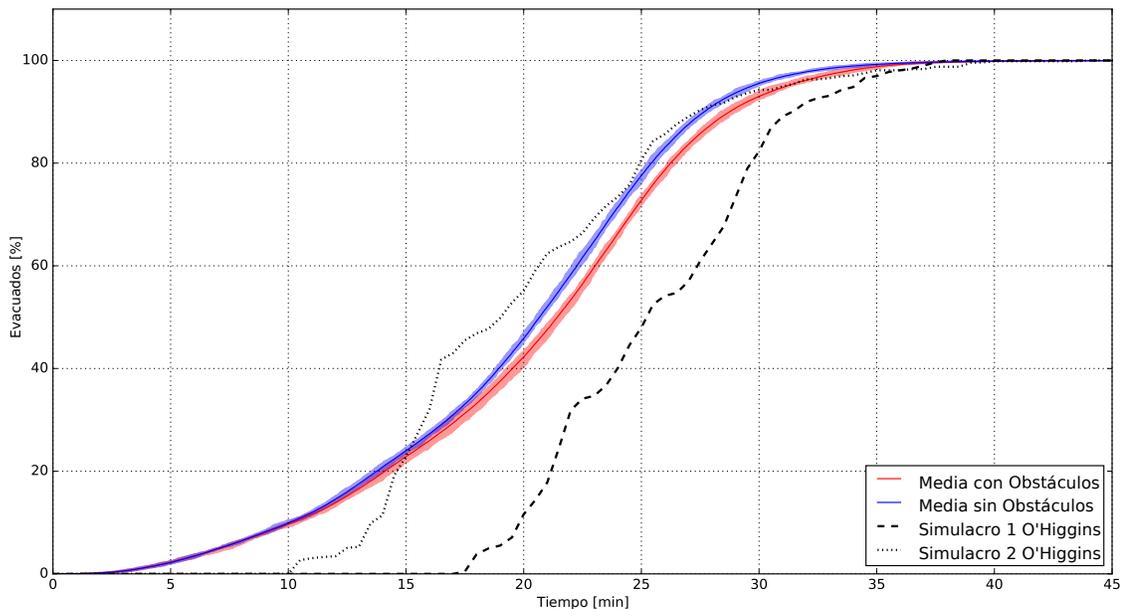


FIGURA 3.7. Validación mediante curvas de evacuación para escenario diurno considerando media del tiempo de salida de 3 min, junto a mediciones del simulacro de 2013. Las bandas corresponden a los límites máximos y mínimos del set de simulaciones realizadas, mientras que la línea central corresponde a la media de las simulaciones.

arrojada por las simulaciones de evacuación. Para la vía de evacuación Zegers no se cuenta con registros completos, por lo que la comparación es realizada con respecto a la vía de evacuación O'Higgins, ruta contigua, de extensión y características similares a Zegers (ver figura 2.1), la cual cuenta con dos mediciones independientes. El escenario de simulación más representativo de un simulacro de evacuación corresponde al caso diurno donde la población evacua rápidamente, por lo que se consideró un tiempo medio de salida de 3 minutos para la validación del modelo. La figura 3.7 presenta una comparación entre las curvas de tiempos de evacuación de las simulaciones y el simulacro en términos porcentuales.

Se observa que los tiempos finales de evacuación bordean los 35 minutos, sin mayores diferencias entre las simulaciones y las mediciones durante el simulacro. Mientras que la forma de las curvas de evacuación difieren sobre todo en los primeros minutos, atribuible

principalmente a la poca participación en el simulacro de personas localizadas en zonas más cercanas a línea de seguridad, cuyo tiempo de llegada al punto de encuentro es bajo.

Las principales diferencias entre un simulacro y una evacuación real son: i) las variaciones en la cantidad de población evaluada, con una participación incompleta en el simulacro, donde muchos no están dispuestos a interrumpir sus actividades, a diferencia de un escenario de evacuación por tsunami, que a causa de la completa participación de la población, puede dar lugar problemas de congestión y con ello un aumento en los tiempos de evacuación; y ii) el comportamiento de las personas frente a una situación de riesgo, puede generar variaciones en la forma y velocidad de desplazarse de algunas personas a través de las rutas de evacuación, a diferencia del comportamiento calmo durante un simulacro. A pesar de lo anterior, la dificultad para obtener mediciones durante evacuaciones reales, hace que la mejor forma de estudiar el comportamiento de la población y validar este tipo simulaciones sea a través de simulacros de evacuación.

3.4. Análisis de sensibilidad

Para cuantificar el efecto de la utilización del parámetro μ en la determinación de la función del tiempo de salida de los evacuados en los resultados de la simulación de evacuación, se realiza un análisis de sensibilidad considerando tres escenarios:

- $\mu=3$ min: Escenario ideal de auto-evacuación de manera inmediata tras el fin de un movimiento sísmico de gran magnitud, cuya duración se estima en 3 minutos. Se considera un adecuado comportamiento de la población gracias a la conciencia sísmica generada tras las experiencias de terremotos tsunamigénicos anteriores (Maule 2010 M_w 8.8, Iquique 2014 M_w 8.2, Illapel 2015 M_w 8.4) y al desarrollo de campañas educativas y realización de simulacros como el de Agosto de 2013 en el norte de Chile (Walker, 2013).
- $\mu=8$ min: Escenario probable de evacuación en caso que la población espere a la emisión de la alarma de tsunami para dar inicio de la evacuación. Valor definido en base al tiempo promedio de emisión de las últimas alarmas de tsunami en Chile

(Iquique 2014 M_w 8.2, Illapel 2015 M_w 8.4 y Chiloé 2016 M_w 7.6), por parte de los organismos encargados de dictar esta información, SHOA y ONEMI.

- $\mu=19$ min: Peor escenario analizado, la población espera la llegada de la primera ola antes de comenzar a evacuar, considerando el tiempo de llegada del primer peak del registro del tsunami de 2014 (ver figura 3.3).

Además de las variaciones en la función que define los tiempos de incorporación de las personas a la evacuación, si sumamos los cambios en la distribución de la población durante el día y noche y la presencia o ausencia de micro-vulnerabilidades urbanas en el entorno de las vías de evacuación, resulta un total de 12 escenarios de evacuación, que fueron simulados con el fin de evaluar diferentes condiciones previas y durante la evacuación.

El efecto de las variables estocásticas empleadas en el modelo; definidas para representar el comportamiento de los agentes como: la posición inicial en las cercanías de la cuadra de origen, la velocidad y el tiempo de salida de los agentes; fueron evaluadas a través de la realización de 30 simulaciones para cada escenario antes mencionado con el fin de generar un error menor al 1 % en el número de evacuados para cada instante de tiempo, empleando un intervalo de confianza del 95 % (Byrne, 2013; Ritter et al., 2011).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Escenarios de evacuación

Los resultados arrojados en este estudio son calculados a partir del set de simulaciones realizadas para cada escenario de evacuación, promediando los valores resultantes de la evolución temporal del número de evacuados. La figura 4.1 presenta los valores medios de las curvas de evacuación para cada escenario modelado, donde las curvas superiores corresponden a resultados de un escenario diurno, y las inferiores a un escenario nocturno. La ciudad de Iquique debido a sus características de núcleo comercial, industrial y educacional, incrementa su actividad durante el día, aumentando la población a evacuar. Los tiempos finales de evacuación, momento en que todas las personas evacuan, no sufren variaciones importantes frente a cambios en la distribución de la población, ya que esta variable depende principalmente de la distancia a recorrer en la ruta de evacuación y a la velocidad de los agentes, parámetros que permanecen constantes en ambos escenarios.

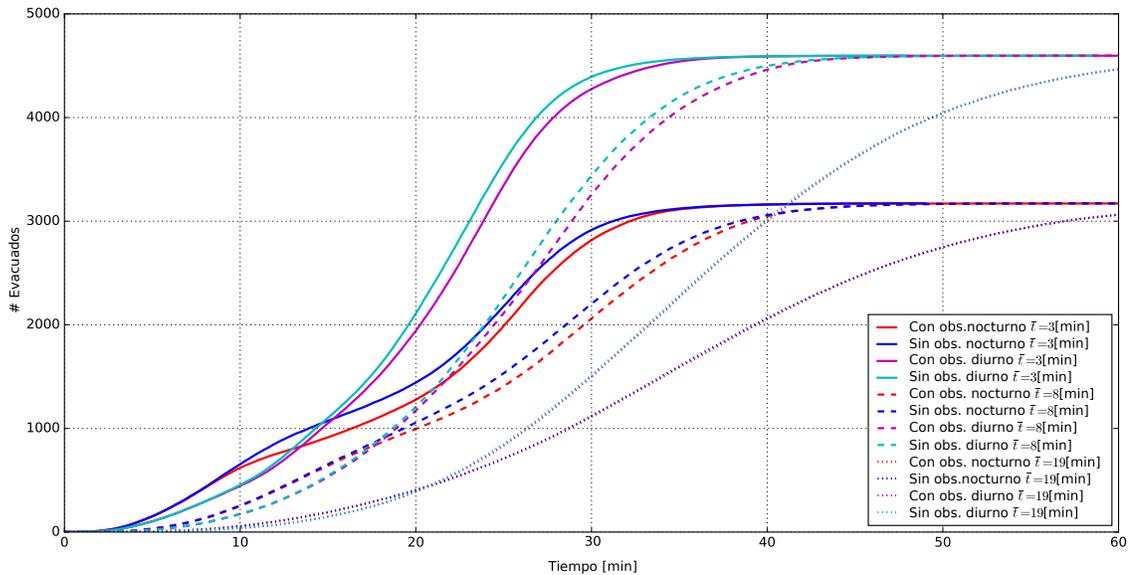


FIGURA 4.1. Curvas de evacuación para cada escenario de evacuación modelado, considerando presencia y ausencia de obstáculos, diferentes tiempos de salida y variaciones en la distribución de la población

Los efectos en la modificación del valor de μ en la curva de evacuación pueden ser observados en la figura 4.1, la forma de las curvas de evacuación se mantiene, pero se genera una elongación de la curva en el tiempo. Situación esperada debido al retardo en la incorporación de los evacuados, generando un peor desempeño del proceso de evacuación. Para los casos de evacuación con un tiempo medio de salida $\mu=3$ min, la evacuación se desarrolla dentro de 30 min, mientras que para el caso de $\mu=8$ min, la evacuación continúa hasta los 47 min, finalmente para el escenario de evacuación tardía, con un valor $\mu=19$ min, la evacuación tarda más de una hora en ser completada.

La curva de evacuación nocturna para $\mu=3$ min presenta una notoria cresta dentro de los primeros 20 minutos, que no se aprecia en el escenario diurno, la causa del rápido crecimiento de la curva en este tramo es atribuible a la distribución espacial de la población durante la noche, donde las cuadras cercanas a la zona de seguridad poseen una gran ocupación, quienes rápidamente acceden a la zona segura. Este fenómeno no se observa para los escenarios de media 8 y 19 min, principalmente debido a las características de la distribución del tiempo de salida utilizada, que hace más heterogénea la incorporación de los agentes a la evacuación y por consiguiente la llegada a la zona segura.

El efecto de la presencia de micro-vulnerabilidades urbanas en el entorno de las vías de evacuación del modelo de agentes se ve reflejado en la diferencia de personas que son capaces de evacuar en un determinado instante de tiempo, cuya máxima diferencia para los casos de tiempo medio de salida $\mu=3$ min bordea las 250 personas en el escenario diurno y 180 personas para el escenario nocturno. Mientras que la diferencia de evacuados entre escenarios con y sin obstrucciones se hace menos notoria a medida que el tiempo medio de salida aumenta. Lo anterior, debido a la menor tasa de salida de evacuados generando vías menos congestionadas, donde las micro-vulnerabilidades urbanas no representan un impedimento para el desplazamiento de una menor cantidad de agentes. Por lo tanto, es posible afirmar una dependencia del retardo producido por las micro-vulnerabilidades en las vías de evacuación con la cantidad de personas evacuando, donde dicho retardo considera los efectos de la disminución de la superficie útil por parte de las obstrucciones y la congestión por el aumento del flujo de personas en las vías de evacuación.

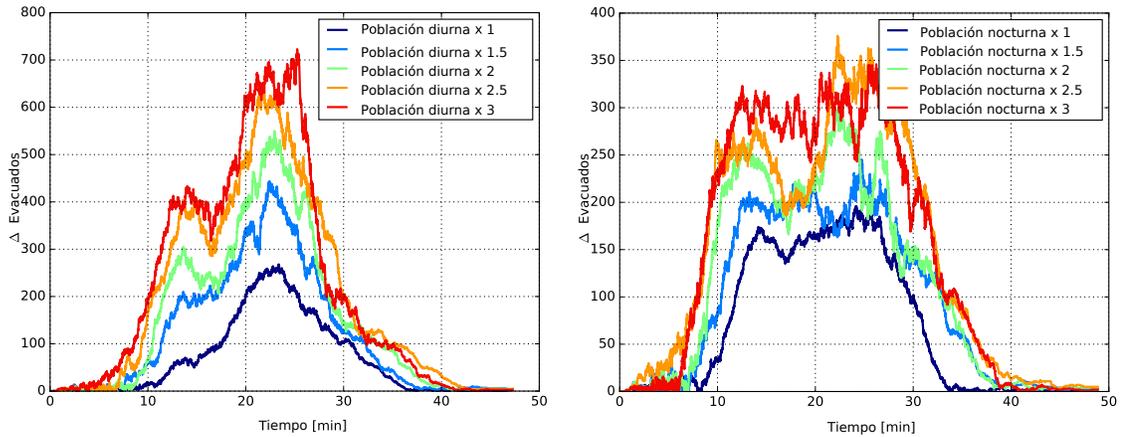


FIGURA 4.2. Diferencia de personas evacuadas producto de la presencia de obstáculos, considerando incrementos de población utilizando multiplicadores [1.5, 2, 2.5, 3]. A la izquierda, escenario diurno. A la derecha, escenario nocturno.

Con el objetivo de dimensionar el efecto de las obstrucciones a medida que aumenta la población a evacuar, se realizaron simulaciones considerando variaciones en la población, multiplicando la población existente en los escenarios diurno y nocturno por factores 1.5, 2, 2.5 y 3. La figura 4.2, muestra gráficamente las diferencias en la cantidad de evacuados entre los casos con y sin presencia de micro-vulnerabilidades urbanas para los diferentes escenarios de incremento de la población. A medida que un mayor número de personas transita por las vías de evacuación, el efecto de la presencia de obstrucciones es mayor, lo que se traduce en una mayor diferencia en la cantidad de evacuados en cada instante entre los casos con y sin presencia de micro-vulnerabilidades urbanas. De este modo, en el escenario diurno, la diferencia de evacuados aumenta desde 250 a 550 para el doble y a 720 evacuados para el triple de la población; mientras que para el escenario nocturno la diferencia de 180 evacuados incrementa a 290 para el doble y 370 para el triple de la población.

4.2. Estimación de fatalidades

El modelo de agentes entrega como resultado la posición de cada agente en el tiempo con una resolución menor a 1 segundo, información que es integrada a los resultados de los escenarios de inundación por tsunami para realizar una estimación de las personas que

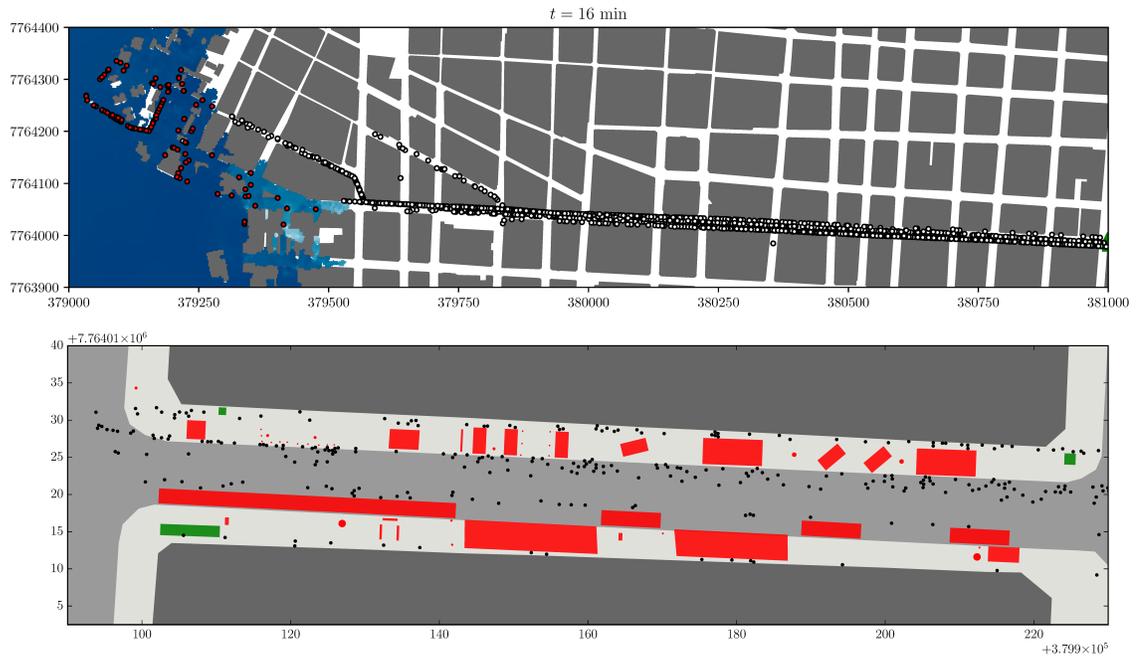


FIGURA 4.3. Arriba, captura temporal de modelo de agentes integrado a simulación de tsunamis escenario M_w 9.0; en blanco, agentes en proceso de evacuación; en rojo, agentes alcanzados por el tsunami. Abajo, detalle del modelo de agentes junto a micro-vulnerabilidades, en verde, obstáculos que disminuyen la velocidad de los agentes; en rojo, obstáculos que bloquean el paso de los agentes.

durante la evacuación son alcanzadas por el tsunami, generando un riesgo de muerte (ver figura 4.3). El criterio empleado para cuantificar la estimación de fatalidades es el contacto con zonas inundadas durante el desplazamiento de los agentes hacia la zona segura, utilizando para ello una evaluación temporal de la posición de cada agente con respecto al tiempo de arribo del tsunami en dicha ubicación (ver figura 4.4). Las tablas 4.1 y 4.2 presentan el promedio de la estimación de fatalidades del set de simulaciones de evacuación para cada escenario de evacuación estudiado, mediante la integración del modelo de agentes a los resultados de escenarios de tsunami tras terremotos de magnitud M_w 8.4 y M_w 9 respectivamente.

Los resultados de la estimación de agentes alcanzados por las ondas de tsunami muestran que para los casos de evacuación temprana (tiempo medio de salida 3 y 8 min), el escenario nocturno presenta un mayor número de afectados, debido a las características

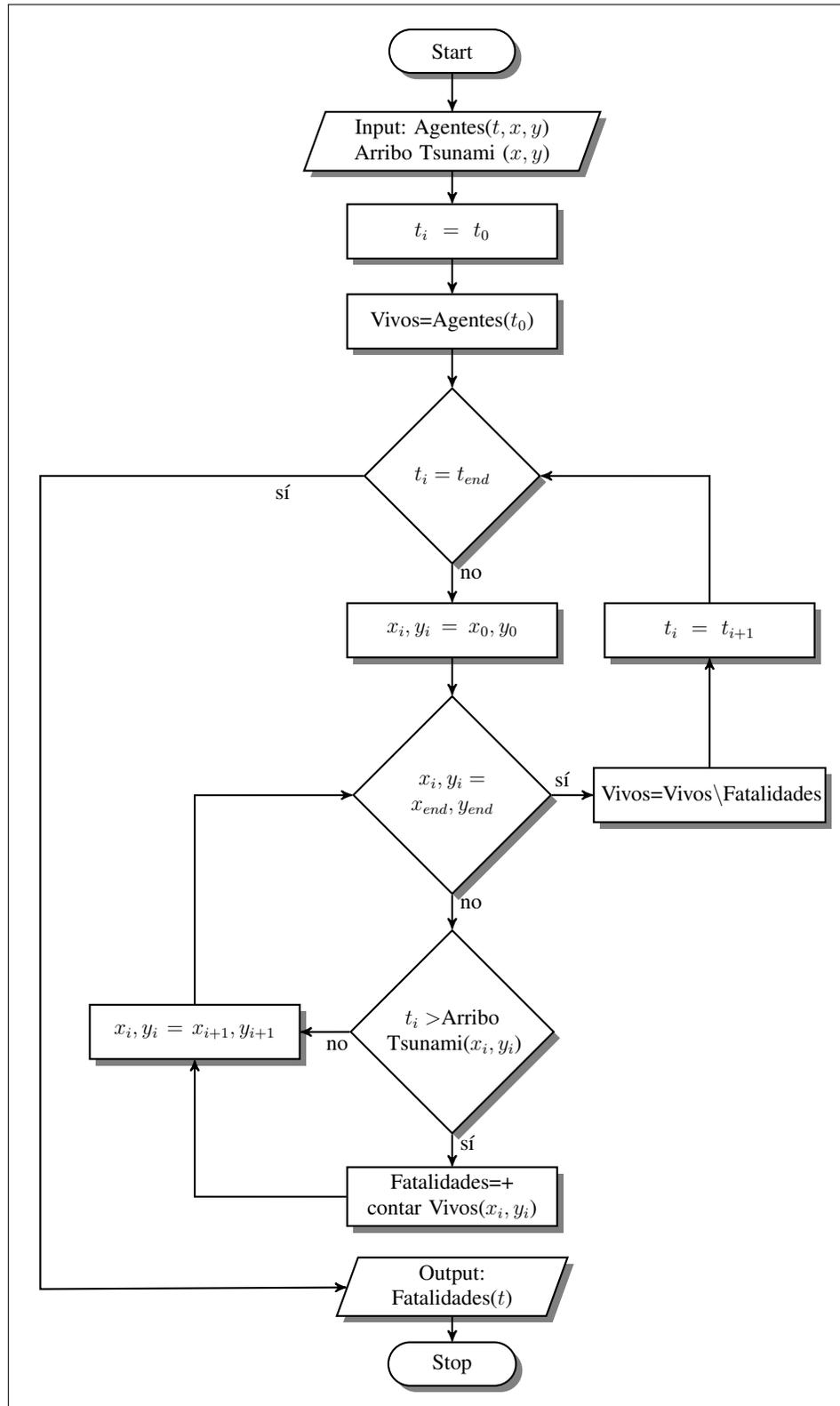


FIGURA 4.4. Diagrama de flujo del algoritmo de estimación de fatalidades.

TABLA 4.1. Estimación de posibles fatalidades y porcentaje con respecto a personas expuestas, considerando agentes alcanzados por las ondas de tsunami, escenario M_w 8.4. Entre paréntesis, fatalidades utilizando simulación de tsunami durante marea alta.

Fatalidades	Movimiento sísmico		Alarma de tsunami		Arribo del tsunami	
	#	%	#	%	#	%
Sin Obs. Nocturno	0 (0)	0 (0)	16 (38)	1.5 (3.5)	352 (516)	32.6 (47.8)
Sin Obs. Diurno	0 (0)	0 (0)	12 (32)	1.5 (3.9)	271 (473)	33.0 (57.7)
Con Obs. Nocturno	0 (0)	0 (0)	18 (39)	1.7 (3.6)	351 (511)	32.5 (47.3)
Con Obs. Diurno	0 (0)	0 (0)	13 (33)	1.6 (4.0)	271 (464)	33.0 (56.6)

TABLA 4.2. Estimación de posibles fatalidades y porcentaje con respecto a personas expuestas, considerando agentes alcanzados por las ondas de tsunami, escenario M_w 9.0. Entre paréntesis, fatalidades utilizando simulación de tsunami durante marea alta.

Fatalidades	Movimiento sísmico		Alarma de tsunami		Arribo del tsunami	
	#	%	#	%	#	%
Sin Obs. Nocturno	0 (3)	0.0 (0.2)	249 (386)	14.4 (22.3)	1080 (1250)	62.3 (72.1)
Sin Obs. Diurno	0 (2)	0.0 (0.1)	218 (361)	9.8 (16.2)	1298 (1528)	58.4 (68.7)
Con Obs. Nocturno	1 (3)	0.1 (0.2)	251 (387)	14.5 (22.3)	1077 (1251)	62.1 (72.2)
Con Obs. Diurno	0 (2)	0.0 (0.1)	215 (355)	9.7 (16.0)	1290 (1524)	58.0 (68.6)

residenciales de la zona más cercana a la costa, generando un alto grado de exposición de los habitantes durante la noche en ambos escenarios de tsunami (M_w 9.0 y M_w 8.4). Para los casos de evacuación tardía (tiempo medio de salida 19 min) el resultado es diferente, durante un terremoto M_w 9.0, la intrusión del tsunami es mayor y alcanza zonas de gran actividad durante un escenario diurno, lo cual sumado a la tardanza en la salida de los evacuados, genera que un gran número de personas sea alcanzada por el tsunami. Por otra parte, una evacuación tardía frente a un escenario M_w 9.0 en un escenario nocturno provoca numerosas posibles fatalidades, pero debido a la menor densidad poblacional en la zona expuesta, las consecuencias son menores que durante el día. Al analizar un tsunami generado por un terremoto M_w 8.4, sumado a un proceso de evacuación tardío, el escenario nocturno es el que cuenta con más agentes que no logran escapar del tsunami, la causa de esto es la menor inundación que genera un terremoto de menor magnitud, que sólo abarca las primeras cuadras, área que coincide con la zona más poblada durante la noche. Para

ambos terremotos estudiados, las simulaciones de tsunami considerando el caso más desfavorable de marea, producen inundaciones de mayor alcance, razón por la cual, todos los escenarios de evacuación experimentan un incremento importante de personas atrapadas por el tsunami en casos de marea alta comparados a casos de simulación considerando el nivel medio del mar.

Las posibles fatalidades estimadas, exponen una baja influencia producto de la inclusión de micro-vulnerabilidades urbanas en el entorno de modelación, por lo que su efecto en este resultado no es significativo, a diferencia del efecto expuesto anteriormente en el desempeño del proceso de evacuación y la diferencia entre el número de evacuados durante su desarrollo.

Sin duda, el factor más importante que determina el éxito y minimiza las personas alcanzadas por el tsunami es el tiempo de incorporación de las personas a la evacuación. Para el escenario de tsunami de menor magnitud, una rápida auto-evacuación tras el término del movimiento sísmico es capaz de evitar completamente la pérdida de vidas, mientras que a medida que la población comienza a evacuar de manera tardía las posibles muertes aumentan a decenas si se espera la alarma de tsunami o incluso cientos de personas afectadas en caso que la evacuación comience sólo tras la visualización del frente de ondas inundando la costa. La situación es peor si consideramos un tsunami generado por un terremoto de gran magnitud, la auto-evacuación permite salvar a gran parte de la población, pero de todas maneras un par de personas pueden ser alcanzadas por las olas, con el incremento del tiempo de salida, las víctimas podrían llegar a cientos e incluso miles para el caso de un comportamiento inadecuado de la población durante este tipo de emergencias.

5. CONCLUSIONES

Actualmente, gracias a la experiencia nacional e internacional frente a eventos tsunamigénicos, Chile cuenta con recomendaciones para el desarrollo de un adecuado sistema de evacuación, el cual se compone de un sistema de alerta temprana, vías de evacuación, zonas de seguridad y puntos de encuentro que permiten reunir a la población y proveer atención ante emergencias (Gutiérrez et al., 2016). Sin embargo, el actual estado de las vías de evacuación no ha sido evaluado y una serie de malas prácticas han sido detectadas particularmente en la ciudad de Iquique. Este estudio realiza una evaluación del desempeño de los procesos de evacuación por tsunami a micro-escala durante diversos escenarios, utilizando para ello un modelo de agentes capaz de reproducir de manera detallada la interacción entre los agentes y de éstos con su entorno. La incorporación de micro-vulnerabilidades urbanas en las vías de evacuación resultaron ser una dificultad para el desplazamiento de los agentes, lo cual se traduce en la disminución del flujo de evacuados y el retraso en los tiempos de evacuación. Para el caso de mayor influencia de las micro-vulnerabilidades ($\mu=3$ min), el flujo instantáneo de evacuados alcanza una diferencia cercana a los 250 evacuados, lo que finalmente se traduce en un retraso del tiempo total de la evacuación de 3 minutos. A pesar de lo anterior estos elementos no mostraron una influencia significativa en el número de personas alcanzadas por los escenarios de tsunami modelados, presentando una diferencia máxima de 8 posibles muertes, valor despreciable considerando el número de personas expuestas en estos eventos.

Los planes de evacuación deben ser enfrentados con una perspectiva a largo plazo, por lo tanto, debido al rápido crecimiento de las ciudades costeras (Neumann et al., 2015), se deben considerar variables como la densidad de habitantes y el efecto que tendría un mayor flujo de personas en las rutas de evacuación durante una eventual ocurrencia de tsunami. Bajo este escenario la presencia de micro-vulnerabilidades urbanas puede generar cuellos de botella, que sumado a la congestión por la cantidad de evacuados, sin duda afectarían negativamente los tiempos de llegada a la zona segura, aumentarían el riesgo de accidentes durante el transcurso de la evacuación y consecuentemente el número de

personas fallecidas por el tsunami. A raíz de lo anterior se recomienda tomar medidas a nivel municipal para evitar principalmente el mal uso de las vías de evacuación, que da lugar a la presencia de automóviles estacionados en la acera y actividades comerciales que disminuyen la superficie útil disponible para evacuar.

El parámetro más importante para garantizar la seguridad de la población detectado fue el tiempo de incorporación de las personas a la evacuación. Las diferencias entre el número de personas alcanzadas por el tsunami durante una rápida auto-evacuación tras el sismo y una evacuación realizada sólo luego de la llegada del primer tren de olas, ascienden a más de mil personas. Tras el desastre del tsunami de 2010, los esfuerzos realizados en Chile se han llevado a cabo en la dirección correcta, mejorando sistemáticamente el sistema de alerta y educando la población respecto al actuar en caso de un sismo de gran magnitud, donde una pronta evacuación ha sido destacada como la mejor manera de mantenerse a salvo.

Independiente del tipo de modelo utilizado, incertezas afectan la precisión en la simulación de los procesos de evacuación, debido a que deben hacerse una serie de suposiciones con el fin de emular el comportamiento de las personas al momento de evacuar, en respuesta a la escasa información proveniente de evacuaciones reales y las dificultades que implica detener las actividades de una ciudad para la realización de simulacros. El modelo de agentes empleado realiza aproximaciones para definir variables como la distribución de la población, tiempos de incorporación a la evacuación, velocidad de los evacuados y geometría del entorno de simulación; basados en la literatura y observaciones en terreno de la zona estudiada. Mientras que los resultados de posibles fatalidades producto del tsunami son afectados además por los supuestos empleados en la definición de los escenarios de tsunami, imprecisiones inherentes al modelo numérico de simulación y el criterio definido para cuantificar las víctimas. A pesar lo anterior, la simulación de evacuación es una potente herramienta que permite observar variables que no pueden identificarse en simulacros y generar múltiples escenarios de análisis. Por esta razón, los resultados de este tipo de estudios tienen un gran valor para quienes toman decisiones, como autoridades locales y organismos encargados del manejo de la emergencia; además para mejorar los actuales planes de

resguardo de la población, la preparación de las personas frente a la amenaza de tsunamis y para adoptar medidas que apunten hacia un mejor entorno urbano que contribuya con la creación de ciudades más resilientes.

Una mejor reproducción de los procesos de evacuación y el desarrollo de modelos de evacuación más precisos y detallados, está vinculado a una mejor comprensión del comportamiento humano frente emergencias. Disciplina altamente compleja, debido a la heterogeneidad e impredecibilidad del razonamiento humano, a medida que se cuente con mayor cantidad de datos y se disponga de mejores aproximaciones, la modelación del actuar de los evacuados mejorará continuamente. Sin embargo, la mejor manera de garantizar la efectividad de los planes de evacuación es mediante la preparación y educación de los habitantes de zonas costeras y sus visitantes. Así como, la difusión de los planes a nivel comunal, realización de simulacros, señalización de las vías y mejoramiento de la infraestructura urbana a macro y micro escala, medidas que son una excelente contribución a la ya existente conciencia de terremotos y tsunamis adquirida gracias a la experiencia de desastres pasados.

ANEXO A. METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE MICRO-VULNERABILIDADES EN LAS VÍAS DE EVACUACIÓN POR TSUNAMI DE IQUIQUE

A.1. Introducción

La mayor parte de la actividad comercial en el mundo se realiza en ciudades puerto, las cuales son importantes áreas de intercambio de recursos, turismo y zonas de recreación. Las ciudades costeras han experimentado un gran crecimiento urbano y un alto incremento demográfico durante las últimas décadas, una tendencia que se espera que continúe en el futuro (Neumann et al., 2015). El crecimiento costero aumenta la exposición de las personas y bienes a amenazas naturales, generando consecuencias negativas en el nivel de riesgo de asentamientos urbanos (Jongman et al., 2012; Kron, 2013).

Los tsunamis son una de las amenazas costeras más desafiantes para comunidades ubicadas en zonas de subducción, donde la rápida llegada de las ondas de tsunami puede producir daños significativos y pérdida de vidas una vez que alcanzan la costa. El riesgo de tsunami está determinado por combinación de la probabilidad de ser alcanzado por estas ondas, el grado de exposición y la vulnerabilidad de la población e infraestructura física. La mitigación del riesgo de tsunami en ciudades costeras requiere la evaluación de cada una de estas dimensiones (amenaza, exposición y vulnerabilidad) (Kron, 2013), mientras que mejorar su resiliencia requiere adicionalmente evaluar su capacidad de absorber perturbaciones, reorganizarse y adaptarse, manteniendo en funcionamiento sus tareas principales (Birkmann, 2006; Cutter et al., 2008).

Experiencias recientes y la mejora en la comprensión de la hidrodinámica de los tsunamis ha aumentado nuestra capacidad de mitigar las consecuencias derivadas de esta amenaza natural. Estos conocimientos han dado lugar al diseño de medidas, las cuales pueden ser catalogadas como estructurales (o “duras”) y no estructurales (o “blandas”). Las primeras corresponden a medidas permanentes como la reubicación a zonas elevadas y construcción de grandes obras de ingeniería civil (por ejemplo, muros verteolares, diques y compuertas) cuyo objetivo es reducir la energía de las ondas de tsunami antes de alcanzar áreas pobladas.

Entre las medidas no estructurales, los sistemas de alerta temprana, planes de evacuación y asistencia inmediata frente a desastres, son consideradas una prioridad para reducir el impacto de tsunamis. Adicionalmente, otras medidas han sido reconocidas, como la planificación urbana, códigos de edificación y planes de recuperación (Bernard y Robinson, 2009; Shuto y Fujima, 2009).

El gran tsunami de Japón en 2011 nos enseñó que las medidas estructurales pueden ser insuficientes, debido a limitaciones en el diseño y datos históricos, como la magnitud del terremoto tsunamigénico y las alturas del tsunami que pueden ser mayores a lo esperado. Sin embargo, estas medidas pueden ser de ayuda en la reducción del impacto de las ondas de tsunami en términos de su altura y tiempos de arribo a la costa (Mori et al., 2013; Fraser et al., 2013). La experiencia global ha demostrado que el método más efectivo de salvar vidas humanas frente un tsunami es mediante una rápida evacuación (Shuto, 2005; Suppasri et al., 2013). Por lo tanto, la implementación de sistemas de alerta y la preparación para la evacuación son muy importantes, al igual que la combinación de diferentes tipos de medidas es crucial para reducir las pérdidas causadas por un tsunami de gran magnitud (Suppasri et al., 2013). A este respecto, se ha señalado que es importante promover la constante inversión en educación, planificación, monitoreo y mejora de la infraestructura urbana (Scheer et al., 2012; Esteban et al., 2013). Esto es especialmente importante en países en vías de desarrollo, donde la utilización de grandes medidas estructurales es poco común, debido a los altos costos y tiempos requeridos para su construcción.

Chile es uno de los países con mayor historial de sismos tsunamigénicos y que enfrentó en 2010 el tsunami latinoamericano más mortífero de las últimas décadas (Fritz et al., 2011). Algunas medidas de tipo estructural fueron implementadas en las zonas más afectadas tras el tsunami de 2010, específicamente en el borde costero de la Región del Bío-bío, estas incluyen paseos costeros, muros verteolados de baja altura y, en mayor medida, reubicación de zonas pobladas en áreas de mayor altura (Khew et al., 2015). No obstante, estas decisiones no son representativas de las medidas adoptadas a nivel de país. En el caso chileno, la mayor parte de los esfuerzos apuntan a promover la concientización del riesgo

de tsunami mediante la educación, simulacros de evacuación e instalación de señalización a lo largo de las vías de evacuación.

El presente estudio se enfoca en el desarrollo de una metodología robusta de identificación y clasificación de potenciales micro-vulnerabilidades en el espacio urbano que pueden dificultar los procesos de evacuación peatonal. Específicamente, el análisis se centra en los aspectos físicos del entorno construido que contribuyen a la vulnerabilidad urbana, en particular en el caso de los tsunamis y la evacuación de la población como respuesta a ellos. Los criterios utilizados para la identificación de estos aspectos se basan en la revisión literaria que examina cómo las características físicas de espacios interiores y exteriores contribuyen a la seguridad de las personas frente a tsunamis y otras amenazas (Ciborowski, 1982; Preuss et al., 2001; Ercolano, 2008; He y Xu, 2012). El objetivo final de este trabajo es aportar a un mejor diseño y utilización de los espacios públicos, particularmente las vías de evacuación, para fomentar la resiliencia de ciudades costeras. Este tema será analizado en la ciudad de Iquique, ubicada en el norte de Chile, susceptible a terremotos de gran magnitud y sus tsunamis asociados, que en la actualidad evidencia problemas de vulnerabilidad urbana para la evacuación (Walker, 2013).

A.2. Brecha en la planificación de evacuación por tsunami: Conexión entre la macro y micro escala urbana

La reconstrucción post-desastre debe ser una oportunidad para utilizar el diseño urbano en vista de lograr una ciudad más resiliente sin descuidar el desarrollo económico y la calidad de vida de las personas afectadas (Kennedy et al., 2008; L. Liu et al., 2014; Yi y Yang, 2014). La necesidad de implementar medidas a corto plazo para garantizar el bienestar de los afectados es causa de que gran parte de las medidas y estudios realizados se enfoquen en la reconstrucción y elaboración de planes de recuperación post-desastre (Steinberg, 2007; Johnson et al., 2006; Platt et al., 2002; Spaling y Vroom, 2007). Sin embargo, sólo unos pocos abordan el replanteamiento del diseño urbano (Ishikawa, 2002; L. Liu et al., 2014; León y March, 2014, 2016; Ciborowski, 1982).

Ishikawa (2002) describe la evolución histórica del manejo del paisaje para mitigar el riesgo de incendios (como resultados de grandes terremotos); destaca el rol de espacios abiertos (e.g. parques y calles) y el mejoramiento de la rivera de ríos para garantizar el acceso al agua, como acciones de planificación para lograr una ciudad más segura. L. Liu et al. (2014) analizan la reconstrucción post-terremoto, mostrando cómo una apropiada disposición de los espacios públicos y el diseño de una red de espacios abiertos y rutas de evacuación permite cambiar la forma urbana, desde una estructura espacial densa a una más atractiva, segura y resiliente a desastres. En tanto, los trabajos de León y March (2014, 2016) enfatizan la importancia del diseño urbano, especialmente la red vial y espacios públicos, en la evacuación, búsqueda de refugio y acceso a servicios básicos y de emergencia frente a la ocurrencia de un tsunami. De manera similar, Ciborowski (1982) plantea que un diseño que considere la capacidad y accesibilidad de la red vial y la presencia de rutas de evacuación puede disminuir la vulnerabilidad urbana y generar un importante impacto en el comportamiento y la actitud de las personas frente a grandes eventos sísmicos.

La planificación urbana tiene el potencial de facilitar la respuesta a la emergencia de comunidades costeras frente a tsunamis si es debidamente integrado al conocimiento geofísico. La planificación puede tener efectos positivos durante todas las etapas del manejo de la emergencia en caso de terremotos y tsunamis. Durante una catástrofe puede proveer rutas seguras para la evacuación y refugio de los evacuados y permite que los servicios de emergencia lleguen a las personas que lo requieren, permitiendo un rápido comienzo de los procesos de recuperación (Allan et al., 2013). Un buen manejo de la forma urbana puede reducir la vulnerabilidad y acentuar las características resilientes en una ciudad, generando mejores condiciones para enfrentar las alteraciones provocadas por eventos como terremotos e inundaciones. Para lograr la resiliencia en ciudades, es necesario producir grados de redundancia, que pueden lograrse a través del aumento de la diversidad espacial y funcional y la integración espacial del ecosistema en los planes urbanos (Allan et al., 2013). Un apropiado diseño urbano no solo acentúa la preparación urbana y seguridad, también promueve el desarrollo de la ciudad y crecimiento del turismo a través de un mejor uso y mejora de los espacios públicos (L. Liu et al., 2014).

La mayoría de los estudios mencionados anteriormente ponen foco en la correcta gestión urbana a escala macro de la configuración urbana; i.e., el sistema de elementos espaciales conectados que deberían estar disponibles para facilitar una apropiada evacuación de la comunidad en riesgo (Hillier et al., 1993); principalmente mediante modificaciones en la conectividad urbana y generación de espacios abiertos, garantizando el acceso a refugios y disponibilidad de servicios básicos. León y March (2016) reportan una brecha en la literatura frente a la reducción del riesgo. Ellos sugieren que es necesaria la realización de un análisis bajo una mirada a micro-escala, i.e., a nivel de experiencia peatonal, de los espacios públicos que se disponen para la evacuación y acceso a zonas seguras frente a eventos como tsunamis. Adicionalmente, Reyes y Miura (2016) mencionan la importancia de evaluar la susceptibilidad y fiabilidad de las vías de evacuación desde una mirada detallada. A la luz de la literatura expuesta, la evaluación de las micro-vulnerabilidades urbanas y la identificación de sus potenciales impactos negativos en los procesos de evacuación queda debidamente justificada.

A.3. Amenaza de tsunami en Iquique

La zona de subducción de Perú-Chile, entre las placas de Nazca y Sudamericana, posee índices extremadamente altos de actividad sísmica, produciendo grandes terremotos ($M_w > 8$) aproximadamente cada 10 años (Contreras-Reyes y Carrizo, 2011); algunos de mayor magnitud han gatillado la generación de tsunamis, provocando pérdidas humanas y cuantiosos daños en infraestructura (Lomnitz, 2004).

Las mediciones post-tsunami de los máximos niveles de runup y el alcance de la inundación son información esencial para una mejor preparación en caso de futuros desastres (Kong, 2011). Sobre esta base, en el caso de los tsunamis de 2010, 2014 y 2015, los máximos runup alcanzaron 29 m en la ciudad de Constitución (Fritz et al., 2011), con un total de 156 fallecidos y 25 desaparecidos (Huerta, 2011), 4.63 m en Caleta Camarones, sin muertes (Catalán et al., 2015) y 13.6 m en La Cebada y 15 víctimas fatales (Contreras-López et al., 2016), respectivamente. A pesar de la magnitud de los terremotos y sus consecuentes tsunamis, la cantidad de muertes fue baja en comparación a eventos de menor magnitud como el

terremoto y tsunami de las Islas Mentawai M_w 7.7 con un número de muertes cercano a 500 personas (Satake et al., 2013). Los autores previamente mencionados atribuyen lo anterior a la cultura de auto-evacuación promovida entre los residentes, demostrando la importancia de la educación, programas de concientización y alarmas eficientes (especialmente cuando se contrastan los últimos eventos chilenos con la tardía evacuación durante el tsunami del Maule en 2010), demostrando que las lecciones de eventos pasados fueron aprendidas (Okal, 2015). A pesar de ello, para el desarrollo de una segura auto-evacuación se requiere un entorno espacial capaz de brindar un adecuado soporte y de resistir el terremoto previo.

El Norte Grande de Chile (un área de aproximadamente 1000 km de largo, que comprende desde la región de Arica hasta el sur de la región de Antofagasta, figura 2.1), ha sido motivo de una constante preocupación por la existencia de una brecha sísmica que ha producido una acumulación de deformación elástica ($6 - 7 \text{ cm yr}^{-1}$) de alta amenaza sísmica (Comte y Pardo, 1991; Métois et al., 2013). Los últimos tsunamis destructivos en esta área ocurrieron en 1868 ($M_w \sim 8.8$), 1877 ($M_w \sim 8.8$), y 2014 (M_w 8.2) (Hayes et al., 2014; Lay et al., 2014; An et al., 2014). Algunos sismos de menor magnitud se han producido en esta área, como los eventos de 1967 M_w 7.4 y el de 2007 M_w 7.7 cerca de la ciudad de Tocopilla; no obstante, gran parte de la zona de subducción de baja profundidad no experimentó rupturas durante un largo periodo (Hayes et al., 2014). De hecho, la liberación de energía en 2014 resultó ser menor a lo esperado, con sólo cerca del 20 % del total de energía acumulada desde el terremoto de 1877 (Lay et al., 2014; Aránguiz et al., 2015). Esto plantea la posibilidad de ocurrencia de un evento de mayor magnitud en el futuro, cuyo epicentro podría ubicarse probablemente al sur o al norte de Iquique (Hayes et al., 2014).

La ciudad de Iquique se ubica en el centro de la brecha sísmica del norte grande de Chile identificada por autores como Comte y Pardo (1991) y Métois et al. (2013). Sin embargo, la amenaza de tsunami no ha sido reconocida de manera adecuada en el desarrollo urbano de las ciudades chilenas. Sólo tras el tsunami de 2010 el gobierno realizó modificaciones a la ordenanza de urbanismo y construcción, definiendo áreas restrictivas para el desarrollo urbano en zonas de inundación por tsunami (MINVU, 2016). Afortunadamente, Iquique

cuenta con características morfológicas adecuadas (a nivel macro) para llevar a cabo una rápida evacuación, gracias a la distribución ortogonal de sus calles (ver figura 2.1).

El terremoto 2014 produjo un tsunami moderado que resultó en inundaciones menores en las cercanías de la costa de Iquique y en localidades pesqueras cercanas, dañando principalmente botes y muelles pequeños; no se registraron daños a edificaciones habitacionales y la mayor parte de los daños fueron producto del terremoto (Catalán et al., 2015; Tomita et al., 2016). Gran parte de la población efectuó una rápida evacuación tras el cese del movimiento sísmico y demostró un buen entendimiento de la alarma de tsunami que fue emitida por las autoridades (Tomita et al., 2016), prueba de las políticas educacionales en desarrollo a nivel nacional. No obstante, una serie de problemas fueron identificados durante la emergencia, estos incluyen el uso de automóviles (que generó accidentes y bloqueo de calles) y la falta de iluminación de calles debido a la falla masiva del suministro eléctrico provocada por el terremoto (León y March, 2016).

Los registros del mareógrafo de Iquique (ver figura 3.3) indican que la primera onda de tsunami llegó a la costa a las 20:56 (hora local), poco más de 9 minutos del comienzo del terremoto, mientras que el primer peak, con una altura de 1.6 m, fue alcanzado a las 21:06 (hora local), sólo 19 minutos después del estallido del terremoto (UNESCO/IOC, 2014). Además, se determinó que los tiempos de arribo para el tsunami de Illapel en 2015 fueron menores a 12 minutos en las mediciones de campo realizadas por Aránguiz et al. (2016). Esto demuestra que, dependiendo de la ubicación de la zona de generación del tsunami, el tiempo disponible para evacuar hacia zonas seguras puede ser escaso; por lo tanto una rápida respuesta y evacuación son esenciales como medidas de protección ante tsunamis de campo cercano en las costas chilenas.

A.4. Metodología

Los espacios públicos (especialmente rutas de evacuación) tienen un rol crítico en el caso de tsunamis de campo cercano en el fomento de la evacuación de peatones hacia zonas seguras. Idealmente, estos espacios deben permanecer despejados y libres de obstáculos

para así garantizar que la capacidad de diseño de la vía no se vea alterada (Scheer et al., 2012). En el trabajo de campo realizado por León y March (2016), se detectaron una serie de puntos vulnerables a nivel micro en las rutas de evacuación en Iquique, los cuales fueron clasificados en tres categorías: i) precarias condiciones físicas e inadecuada mantención, ii) problemas relacionados al diseño del espacio público, y iii) uso inapropiado de la acera.

Como complemento al trabajo de León y March, se realiza un análisis detallado a micro-escala del contexto urbano de Iquique, con la intención de caracterizar las potenciales dificultades para llevar a cabo procesos de evacuación efectivos. La zona céntrica de Iquique (ver figura 2.1), es un área urbana caracterizada por una alta densidad poblacional y tasa de motorización, junto a la presencia de una intensa actividad comercial, turística, industrial y educacional; factores que contribuyen a una alta exposición a la amenaza de tsunami y motivan el desarrollo de la metodología propuesta.

Esta investigación fue desarrollada siguiendo una trayectoria secuencial de análisis (Cullen, 1961; Clay, 1994) a lo largo de las vías de evacuación propuestas por la municipalidad de Iquique en conjunto con la Oficina Nacional de Emergencia en su plan de protección civil ante tsunamis (IMI y ONEMI, 2013). Estas rutas fueron definidas como las trayectorias más cortas, orientadas de oeste a este desde la línea de costa, que conducen hacia zonas elevadas (30 metros sobre el nivel del mar). La metodología empleada en este estudio contempla tres etapas. En primer lugar, se realiza un extensivo trabajo de campo para llevar a cabo un diagnóstico de las vías de evacuación, siguiendo el camino de los evacuados durante su escape. A continuación, las micro-vulnerabilidades detectadas son geo-referenciadas y clasificadas de acuerdo a su complejidad y consecuencias en la evacuación y finalmente, se propone un indicador de fricción que considera la reducción de velocidad de los peatones basado en la revisión de literatura.

A.4.1. Trabajo de campo

Durante Octubre de 2015 se realizó un diagnóstico detallado de la situación actual de las vías de evacuación, mediante un trabajo de campo en la zona central de la ciudad de

Iquique. Específicamente el sector analizado está limitado de norte a sur por las calles Sotomayor y Libertad (ver figura 2.1), que incluye el casco histórico de la ciudad y el área de influencia del puerto, junto a sectores de actividad habitacional, educacional y comercial. Más de 45 kilómetros de vías de evacuación fueron evaluadas con ayuda de registros en video y dispositivos de Sistema de Posicionamiento Global (GPS), los cuales fueron usados para geo-referenciar las micro-vulnerabilidades existentes que los peatones pueden experimentar durante una evacuación de emergencia.

Durante el trabajo de campo, los siguientes tipos de micro-vulnerabilidades fueron observados como los elementos más comunes capaces de dificultar la evacuación: i) presencia de automóviles estacionados en la acera, ii) angostamientos de la acera para dar paso a estacionamiento vehicular, iii) uso de la acera para extender el área de servicio de restaurantes (sólo durante el día y tarde), iv) utilización de espacios públicos por comercio informal, y v) trabajos en la vía pública. Estos últimos corresponden a vulnerabilidades de tipo temporal, por lo cual sólo representan una condición específica y no habitual en las calles de la ciudad (ver figura A.1).

Dentro de los problemas mencionados, el de mayor preocupación es la ubicación de automóviles estacionados en zonas destinadas al tránsito peatonal. Debido a las grandes dimensiones de estas obstrucciones, la superficie útil se ve reducida y afecta considerablemente la capacidad de las vías de evacuación; en algunos casos, el ancho disponible en la acera es reducido a menos de un metro, lo cual frente una eventual evacuación significaría la formación de cuellos de botella que retardarían los tiempos de evacuación. Adicionalmente, existen sectores destinados para estacionamientos que disminuyen la superficie de la acera, denominados en este trabajo como “angostamientos”. La presencia de estos elementos responde a la necesidad de contar con espacios públicos para estacionar automóviles debido a la alta tasa de motorización de la ciudad y a que gran parte de los domicilios, principalmente construcciones antiguas, no cuentan con estacionamientos, forzando a los residentes estacionar sus vehículos en espacios públicos.

A.4.2. Análisis de los datos

Durante la etapa de postproceso, a través del análisis de los datos recolectados en el trabajo de campo, se evaluó de manera exhaustiva los elementos que representan un impedimento o retraso del movimiento peatonal en las vías de evacuación, contribuyendo a la vulnerabilidad de los espacios públicos. Este proceso consistió en la identificación de los elementos dentro de los espacios urbanos estudiados que pueden influenciar en la disminución de la rapidez de los evacuados, considerando los resultados de la literatura referente a la dinámica peatonal (Soule y Goldman, 1972; Fujiyama y Tyler, 2014). Posteriormente estos elementos fueron clasificados de acuerdo a tres criterios principales: i) bloqueo o disminución del espacio disponible para el tránsito, ii) cambios de nivel bruscos en la superficie, y iii) cambios considerables en la rugosidad de la superficie.



FIGURA A.1. Fotogramas obtenidos de registros en terreno en la ciudad de Iquique.(arriba-izquierda) Vehículos mal estacionados. (arriba-derecha) Comercio informal. (abajo-izquierda) Obras en la vía. (abajo-derecha) Mesas de restaurante en la acera.

Tras la identificación de las micro-vulnerabilidades, estas fueron trazadas en el mapa de la ciudad mediante el uso de herramientas de información geográfica (ArcGIS) en un sistema de proyección plano, intentando reproducir fielmente sus dimensiones con el fin de generar un mapa que incluye las micro-vulnerabilidades presentes en cada una de las vías de evacuación de la zona de estudio. El mapeo de las micro-vulnerabilidades mediante sistemas de información geográfica entrega información respecto a características del elemento, su ubicación y superficie que abarca, facilitando la organización, manipulación y análisis de la gran cantidad de datos obtenidos (ver figura A.2).

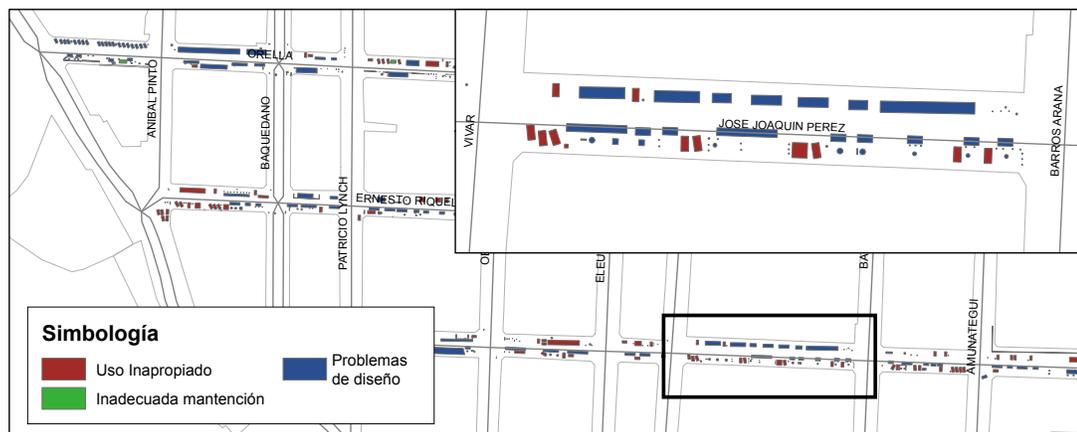


FIGURA A.2. Mapeo de micro-vulnerabilidades identificadas, coloreados según su taxonomía.

Con la finalidad de generar una taxonomía basada en el origen de los problemas observados, siguiendo los lineamientos propuestos por León y March (2016), estos fueron agrupados en tres categorías, i) uso inapropiado, ii) mantención inadecuada, y iii) problemas relacionados al diseño de las vías de evacuación, cuya descripción se encuentra en la Tabla A.1. Esta clasificación al obedecer a una representación de las micro-vulnerabilidades en términos de su procedencia, también brinda una estimación acerca de las políticas públicas que pueden ser implementadas a nivel de normativas municipales para disminuir su efecto sobre procesos de evacuación futuros. Mientras que el uso inapropiado e inadecuada mantención de las rutas pueden ser rectificadas mediante estrategias de fácil implementación, los problemas relacionados al diseño requieren de medidas más invasivas.

A.4.3. Nivel de obstrucción de las vías de evacuación

En la sección anterior, se describió de manera cualitativa los tipos de dificultades con las que un peatón puede encontrarse al evacuar por las rutas de Iquique. Este trabajo provee además herramientas para evaluar cuantitativamente los problemas detectados y comparar entre vías de evacuación. La cuantificación de las micro-vulnerabilidades y el nivel de obstrucción de las vías de evacuación queda definido a través de un índice de fricción propuesto, definido como:

$$i[\%] = \frac{\sum_j S_{m_j} \cdot \alpha_j}{S_r} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

$$\alpha_j = 1 - SCV_j \quad (\text{A.2})$$

Donde:

S_m : Superficie de micro-vulnerabilidad asociada a una vía de evacuación.

S_r : Superficie de la vía de evacuación analizada.

α : Factor de reducción de velocidad asociado a cada micro-vulnerabilidad.

Este indicador representa la proporción del área de una vía de evacuación que es ocupada por las micro-vulnerabilidades presentes en ella. Para distinguir cómo un peatón se ve afectado al enfrentarse a una determinada micro-vulnerabilidad, se definió el factor α para cuantificar su reducción de velocidad; de este modo, se pondera de manera diferenciada el efecto de cada elemento en el factor de fricción. El factor α corresponde al complemento de la magnitud definida como Speed Conservation Value (SCV), Ecuación A.2, (Wood y

TABLA A.1. Clasificación de las micro-vulnerabilidades respecto su origen.

Taxonomía	Descripción
Mal uso	Utilización inadecuada y apropiación de la acera para usos múltiples diferentes al tránsito peatonal, e.g. estacionamientos, restaurantes, jardines.
Mala mantención	Falta de cuidado y reparación de espacios públicos por parte de la autoridad competente o particulares, e.g. veredas rotas y tapas de cámara rotas.
Problema de diseño	Dificultades presentes en la vía asociadas a su planificación y construcción, e.g. angostamientos de la acera y escaleras.

Schmidtlein, 2012; Schmidtlein y Wood, 2015) que representa el porcentaje de la máxima velocidad que se puede presentar en una determinada superficie. Para ello, cada micro-vulnerabilidad fue clasificada de acuerdo a una de estas categorías: i) bloqueos, ii) cambios de nivel, y iii) rugosidad de la superficie. Donde la máxima velocidad es alcanzada en terrenos compactados y planos como el pavimento de calles y aceras (Soule y Goldman, 1972), casos en que la velocidad se conserva totalmente $SCV = 1$.

Para cada micro-vulnerabilidad, se asignó un valor SCV (ver tabla 3.1). Para aquellos elementos que no permiten el paso a través de ellos y representan un bloqueo al tránsito peatonal, el valor de SCV es nulo. Dentro de las micro-vulnerabilidades detectadas, existen elementos que sí permiten el paso, pero implican un cambio en la velocidad normal de movimiento como cambios de nivel, que requieren que el peatón realice un esfuerzo adicional para avanzar, y cambios en la materialidad de la superficie que se ven traducidos en una mayor dificultad para desplazarse. Los valores elegidos fueron seleccionados de literatura experimental referente a mediciones de velocidad peatonal en diversas condiciones; en el caso de cambios de nivel, la conservación de velocidad se definió cercana a un 50 % (Fujiyama y Tyler, 2014) y para cambios en la materialidad de la superficie, alrededor de 90 % (Schmidtlein y Wood, 2015).

Resumiendo, la ecuación A.1 representa la suma de todas las áreas de las micro-vulnerabilidades de una vía de evacuación particular, ponderadas individualmente por un factor de reducción de velocidad basado en una revisión de literatura experimental, ecuación A.2. El factor de fricción es el cociente entre esta sumatoria y la superficie total de la vía de evacuación, que luego es multiplicada por 100 para trabajar en términos porcentuales. La zona analizada contempla vías de evacuación de dimensiones de calzada similares en toda su extensión; por esta razón se utiliza la superficie total de las vías de evacuación, haciendo posible analizar la contribución a la vulnerabilidad de automóviles estacionados total o parcialmente en la calzada. En casos en que las dimensiones de la sección transversal de la calzada difieran entre las vías de evacuación analizadas, se debe realizar un análisis separado de la acera y la calzada.

A.5. Resultados y discusión

El propósito de calcular el índice de fricción definido en la sección anterior es tener una medida del efecto de las micro-vulnerabilidades en el espacio disponible para el movimiento de los evacuados a lo largo de cada vía de evacuación, permitiendo su comparación y determinar el grado de vulnerabilidad relativa. Este índice incluye las superficies de la acera y calzada, pero no considera los automóviles circulando en la calzada como micro-vulnerabilidades, debido a la variabilidad de esta condición. Los altos índices de motorización en la ciudad y los antecedentes de uso de vehículos en evacuaciones anteriores (Matus y Muñoz, 2014; Riveros, 2014) son un precedente negativo y que sin duda aumentan la vulnerabilidad de las personas durante una evacuación, limitando el movimiento de las personas principalmente a la acera (ver figura A.3).

En la figura A.4, los resultados del cálculo de los índices de fricción para las calles analizadas en este estudio son presentadas gráficamente. Se observa que los valores más altos de índice de fricción están concentrados en la parte central del área de estudio, debido a su condición de zona de mayor actividad del centro de Iquique, resultado de la alta presencia de instituciones educacionales, edificios de oficinas e instalaciones comerciales. El máximo valor del índice de fricción, para la calle O'Higgins (vía de evacuación que al momento de realizar el estudio se encontraba intervenida en algunos tramos por obras de mejoramiento vial) bordea el 20 %. La segunda vía de evacuación con un alto índice de fricción, calle Latorre, es objeto de preocupación por la cantidad de personas que llegarían durante una evacuación, especialmente debido a que corresponde al acceso más corto a la zona segura para parte de la población que reside en la península al sur del puerto (aproximadamente 530 personas). Siguiendo este análisis, el resto de la población de la península (alrededor de 780 personas (INE, 2012)) debe evacuar por la calle Zegers, la tercera ruta de evacuación que posee una gran cantidad de micro-vulnerabilidades en toda su extensión.

El área del puerto merece una especial atención debido a su larga distancia a las zonas de seguridad. A este respecto, representantes de la empresa portuaria de Iquique estimaron que en el peor escenario podrían haber más de 1500 trabajadores. Afortunadamente, las



FIGURA A.3. Evacuación preventiva 16 de Marzo de 2014 (CNN Chile, 2014).

vías de evacuación accesibles para el personal del puerto de Iquique, calles Esmeralda y Bolívar, poseen bajos índices de fricción. Sin embargo, el mayor problema para los trabajadores es el tiempo que tardan en salir del puerto y llegar a la zona segura. Considerando las observaciones mencionadas, la mayor preocupación en el centro de Iquique es la calle Zegers por su alto índice de fricción y cercanía a la costa a diferencia de calle Latorre; por otra parte, la calle O'Higgins debe ser removida del análisis a causa de los elementos temporales que contribuyeron a su índice de fricción durante el trabajo de campo. El resto de las vías de evacuación poseen índices de fricción más bajos, pero de todas maneras se esperan algunas reducciones de velocidad y pérdidas en la capacidad de flujo de las vía de evacuación. Agrupando todas las micro-vulnerabilidades y sumando su contribución al factor de fricción de la zona de estudio, es posible deducir que el mayor problema es el

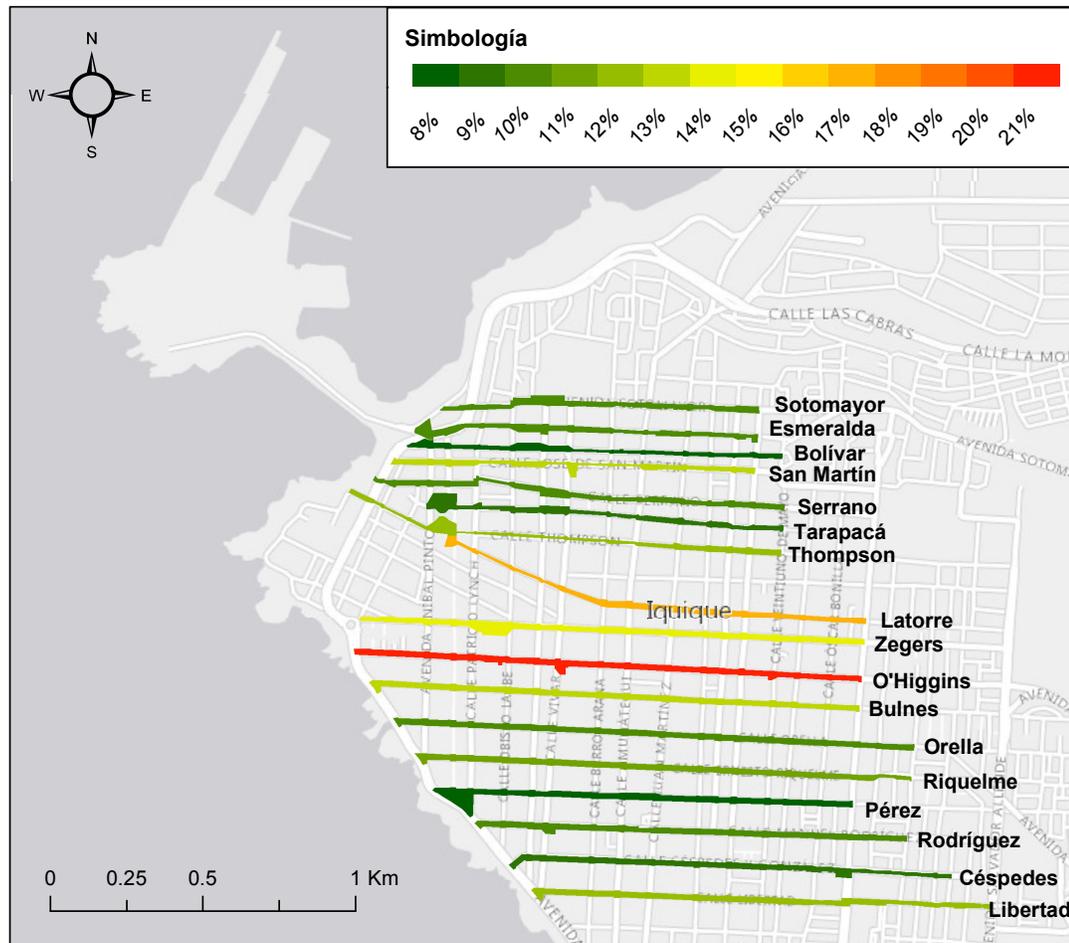


FIGURA A.4. Mapa de índices de fricción obtenidos para las vías de evacuación en la zona de estudio.

uso inapropiado del espacio urbano para estacionar automóviles, ya sea en la acera o en las calles, con cerca del 74 % de contribución al índice de fricción total. Uno de los resultados más ilustrativos de la metodología desarrollada es proveer medios para evaluar los inconvenientes del uso de la acera como estacionamiento, generalmente de manera perpendicular a la dirección de tránsito, donde en algunos casos la acera disminuye su ancho efectivo de alrededor de 4 m a prácticamente 1 m. A través de la presente metodología de identificación de micro-vulnerabilidades es posible precisar problemas urbanos relacionados al desplazamiento de los evacuados, cuantificar sus impactos y priorizar soluciones con diferentes niveles de complejidad.

En Chile, la definición de zonas amenazadas y seguras ante tsunamis, junto a la elaboración de los planes de evacuación es una labor de la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI), mientras que el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) es el encargado de la planificación y el desarrollo urbano, quien además define el uso de los espacios urbanos. No obstante, la ejecución y supervisión de los planes de las altas autoridades se encuentra en manos de las municipalidades. Esta fragmentación institucional conduce a diferentes estrategias de reducción del riesgo, a pesar de lo anterior, se han realizado esfuerzos para estandarizar la planificación urbana relacionada a la infraestructura de evacuación por tsunami (Gutiérrez et al., 2016).

Como parte del trabajo de campo se realizó una entrevista con personal de la Dirección Regional de la ONEMI y de la municipalidad de Iquique, donde fueron discutidos los planes relacionados a mejoras en los planes de evacuación. Las autoridades mencionadas propusieron ideas de mejora de los planes e infraestructura de evacuación, entre las cuales se encuentra la creación de rutas principales de evacuación planeadas para el uso exclusivo de los peatones durante una evacuación. Se destacó la internalización de los procesos de evacuación en la población y se mencionó también la preocupación respecto al uso de automóviles durante la última evacuación el año 2014. Como resultado de este estudio se propone una serie de medidas de mitigación que pueden ser ejecutadas a nivel municipal en Iquique, orientadas a mejorar el diseño urbano para la evacuación. La más directa de ellas es la regulación del estacionamiento de automóviles en espacios públicos, mediante el uso de atribuciones municipales como multas en áreas cercanas a la costa. Otras medidas como la creación de espacios adicionales para estacionamiento en calles perpendiculares a las vías de evacuación, instalación de elementos que impidan el paso de automóviles hacia la acera y el retiro de autos en desuso son fuertemente recomendadas. Del mismo modo, actividades diurnas como el comercio informal y comedores deben realizarse sólo en calles no contempladas como vías de evacuación. La implementación de estas modificaciones debe tener en consideración posibles efectos en el tráfico existente, economía local, como también reacciones político-sociales.

Los resultados expuestos demuestran la existencia de micro-vulnerabilidades en las vías de evacuación del área de estudio y caracterizan su efecto en los procesos de evacuación por tsunami. No obstante, el trabajo de campo registró una ventana de tiempo particular y no se realizó un análisis de la evolución temporal de la ubicación de las micro-vulnerabilidades en las calles de Iquique. Un análisis de este tipo requeriría una cantidad significativa de recursos y esfuerzos, debido al tiempo requerido para trabajar a una escala tan detallada como la de este estudio. La realización de un estudio que involucre la temporalidad podría ser posible a través de procesos automatizados de mapeo de micro-vulnerabilidades utilizando herramientas de detección de objetos en imágenes como también imágenes satelitales de altísima resolución y frecuencia de captura. A pesar de lo anterior, el presente estudio examina una situación lo más cercana posible a la cotidianidad de la ciudad, i.e., durante la temporada laboral del año y días de gran actividad laboral, educacional y comercial. La metodología presentada es un importante paso a la caracterización de vulnerabilidades urbanas a micro-escala, cuantificar sus efectos y proveer herramientas para la toma de decisiones relacionadas el diseño urbano y mejoramiento de los procesos de evacuación.

A.6. Conclusiones

Los tsunamis son una amenaza de origen natural que siempre estará presente en países de alta actividad sísmica como Chile y son causa de gran preocupación en ciudades costeras. Para enfrentar esta amenaza es necesaria la acción conjunta del área política, financiera, social, técnica y científica para evitar que estos eventos se transformen en un desastre. Los programas de educación de tsunamis y simulacros de evacuación han tenido buenos resultados y demostrado ser efectivos durante los tsunamis chilenos de 2014 y 2015 (Aránguiz et al., 2015; Tomita et al., 2016), sin embargo, estos eventos fueron de una magnitud menor que el desastroso tsunami de 2010. Los últimos dos eventos han permitido evaluar la respuesta de ciudades costeras frente a eventos menores, y desarrollar nuevas estrategias para el continuo mejoramiento de la respuesta de evacuación frente a tsunamis de mayor

magnitud. El mejoramiento del entorno y la habilidad de la comunidad para reaccionar adecuadamente cuando se enfrenta a una gran perturbación es fundamental, ya que una escasa preparación da lugar a ambientes vulnerables (Guha-Sapir et al., 2011; Yi y Yang, 2014).

Este estudio destaca la importancia de las vías de evacuación, espacios públicos planeados para múltiples usos que también permiten la evacuación por tsunamis, y la evaluación de la condición del entorno construido. Se evalúa la presencia de características físicas negativas resultantes de problemas de planificación, utilización y mantenimiento, y su influencia en el desplazamiento de las personas a zonas seguras y el retraso de los procesos de evacuación. La disminución del área efectivamente disponible en las vías de evacuación causadas por la presencia de obstrucciones en la acera fue identificada como el mayor problema en la ciudad de Iquique, lo cual puede empeorar con los años debido a la gran actividad y a la tendencia de crecimiento poblacional en zonas costeras. Cuando este crecimiento ocurre en conjunto a mejoras urbanas en pos de la resiliencia tanto en la macro como micro-escala, promueve ambientes mejor preparados y podría mejorar la respuesta de las personas en caso de emergencias. Últimamente la construcción de edificaciones en altura ha ido en crecimiento, la posibilidad de utilizarlos como refugios de evacuación vertical debe ser cuidadosamente analizada, teniendo en consideración el diseño sísmico, capacidad y resistencia a fuerzas hidrodinámicas. La disponibilidad de edificaciones para propósitos de evacuación vertical disminuiría considerablemente el flujo peatonal durante una evacuación, propiciando evacuaciones más seguras. En particular, su uso es fuertemente recomendado para evacuar a los trabajadores del puerto de Iquique (Solís y Gazmuri, 2017; León y March, 2016), quienes representan al sector más expuesto a tsunamis, producto de su lejanía de la zona segura.

El principal problema en Iquique se relaciona al uso de automóviles, la contribución de otras micro-vulnerabilidades a los factores de fricción y su efecto en la disminución de la capacidad de flujo de las vías de evacuación es menor, siendo la presencia de comercio informal, expansiones de restaurantes y árboles en las vías, las cuales alcanzan valores entre 2-3 % del factor de fricción total, las más importantes de notar. Lo cual indica el foco

de futuras investigaciones y las principales medidas de mitigación que deben ser adoptadas. Con el propósito de disminuir la presencia de micro-vulnerabilidades, las autoridades locales pueden ejecutar medidas, donde su origen podría indicar señales de cómo actuar. El uso inapropiado de las vías de evacuación puede ser rectificado a través de restricciones y multas designadas por la municipalidad. Del mismo modo, pueden realizarse métodos para el monitoreo de posibles dificultades generadas por la inadecuada mantención de las rutas. Finalmente, los problemas relacionados al diseño son los más difíciles de revertir y pueden ser corregidas a través de la construcción de nuevas obras o de la modernización de las áreas existentes, tomando en cuenta la evacuación como un parámetro importante.

Mientras que la red vial y la infraestructura de una ciudad juega un rol importante durante una emergencia, también pueden surgir una serie de dificultades, por ejemplo la falla del suministro de energía eléctrica, y la precariedad de las condiciones del entorno construido producto de un fuerte terremoto, además de las micro-vulnerabilidades existentes. Generalmente, la identificación de micro-vulnerabilidades urbanas no ha sido realizada a gran escala y la inversión en medidas de mitigación no es una prioridad en países en desarrollo. En áreas propensas a tsunamis de campo cercano, donde el tiempo para evacuar puede ser limitado, como las ciudades costeras de Chile, las micro-vulnerabilidades urbanas pueden hacer la diferencia en el desarrollo de procesos de evacuación. Si las rutas de evacuación permanecen despejadas y libres de obstáculos, el movimiento de los evacuados podría ser más rápido y el tiempo total de evacuación podría disminuir y eventualmente salvar vidas. La evaluación de la condición de las vías de evacuación debería hacerse regularmente, especialmente en ciudades de países del Pacífico Sur con alto riesgo sísmico y de tsunami, donde el entorno que se muestra en los mapas y planes generalmente es diferente a la realidad que experimentan los peatones.

Los esfuerzos por crear una ciudad más resiliente no pueden estar presente sólo tras un desastre, sino que debe ser un aspecto continuo dentro de la toma de decisiones y el comportamiento de las personas. Ser receptivos de la información que entregan las autoridades para evitar conductas erradas y promover la utilización adecuada de los espacios públicos

son sin duda importantes comportamientos diarios que disminuyen la vulnerabilidad de la población y contribuyen a incrementar la resiliencia de zonas costeras.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan, P., Bryant, M., Wirsching, C., Garcia, D., y Teresa Rodriguez, M. (2013). The influence of urban morphology on the resilience of cities following an earthquake. *Journal of Urban Design*, 18(2), 242–262.
- An, C., Sepúlveda, I., y Liu, P. L.-F. (2014). Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3988–3994.
- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Yagi, Y., . . . others (2016). The 16 september 2015 Chile tsunami from the post-tsunami survey and numerical modeling perspectives. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2), 333–348.
- Aránguiz, R., Urrea, L., González, J., Jager, T., Wester, F., Smoor, A., y Tiehatten, B. (2015). Numerical simulation of new proposed tsunami scenarios for Iquique, Chile. En *36th iahr world congress, the hague, the netherlands*.
- Arikawa, T., y Oie, T. (2015). Study of evacuation behavior characteristic using evacuation simulator coupled with numerical wave flume. *Proceedings of the Japanese conference on coastal engineering*, 71(2), I319-I324.
- Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Inazawa, Y., y Kikkojin, M. (2014). Tsunami inundation modeling of the 2011 Tohoku earthquake using three-dimensional building data for Sendai, Miyagi prefecture, Japan. En *Tsunami events and lessons learned* (pp. 89–98). Springer.
- Berger, M. J., George, D. L., LeVeque, R. J., y Mandli, K. T. (2011). The geoclaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources*, 34(9), 1195–1206.

- Bernard, E., y Robinson, A. (2009). Tsunamis. En (cap. Tsunami modeling: Calculating inundation and hazard maps). Harvard University Press.
- Bilek, S. L. (2010). Invited review paper: Seismicity along the South American subduction zone: Review of large earthquakes, tsunamis, and subduction zone complexity. *Tectonophysics*, 495(1), 2–14.
- Birkmann, J. (2006). Measuring vulnerability to natural hazards: Towards disaster resilient societies. En (cap. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions). United Nations University, Tokyo.
- Braun, A., Bodmann, B. E., y Musse, S. R. (2005). Simulating virtual crowds in emergency situations. En *Proceedings of the acm symposium on virtual reality software and technology* (pp. 244–252).
- Byrne, M. D. (2013). How many times should a stochastic model be run? an approach based on confidence intervals. En *Proceedings of the 12th international conference on cognitive modeling, ottawa*.
- Catalán, P., Aránguiz, R., González, G., Tomita, T., Cienfuegos, R., González, J., ... others (2015). The 1 april 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling. *Geophysical Research Letters*, 42(8), 2918–2925.
- Chlieh, M., Perfettini, H., H.Tavera, Avouac, J., Remy, D., Nocquet, J., ... Bonvalot, S. (2011). Interseismic coupling and seismic potential along the central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research*(n. 116), 1–21.
- Ciborowski, A. (1982). Physical development planning and urban design in earthquake-prone areas. *Engineering Structures*, 4(3), 153–160.
- Cienfuegos, R., Suárez, L., Urrutia, A., Aránguiz, R., González, G., González, J., ... Honda, K. (2014). Reassessment of tsunami hazard in the city of Iquique, Chile, after the Pisagua earthquake of april 2014. En *Agu fall meeting*.

Clawpack Development Team. (2015). *Geoclaw software*. Descargado de <http://www.clawpack.org/geoclaw> (Version 5.3.1) doi: 10.5281/zenodo.50982

Clay, G. (1994). *Real places: An unconventional guide to america's generic landscape*. University of Chicago Press.

CNN Chile. (2014, March). *Así se sintió la alerta preventiva tras el sismo en Iquique*. Descargado de <http://www.cnn{Chile}.com/noticia/2014/03/16/asi-se-sintio-la-alerta-preventiva-tras-el-sismo-en-Iquique> (Acceso: 2017-03-07)

Comte, D., y Pardo, M. (1991). Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4(1), 23–44.

Contreras-López, M., Winckler, P., Sepúlveda, I., Andaur-Álvarez, A., Cortés-Molina, F., Guerrero, C. J., ... others (2016). Field survey of the 2015 Chile tsunami with emphasis on coastal wetland and conservation areas. *Pure and Applied Geophysics*, 173(2), 349–367.

Contreras-Reyes, E., y Carrizo, D. (2011). Control of high oceanic features and subduction channel on earthquake ruptures along the Chile-Peru subduction zone. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 186(1), 49–58.

Cullen, G. (1961). *Townscape London*. The Architectural Press London.

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., y Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global environmental change*, 18(4), 598–606.

Daamen, W., y Hoogendoorn, S. (2007). Free speed distributions based on empirical data in different traffic conditions. *Pedestrian and evacuation dynamics 2005*, 13–25.

Delouis, B., Pardo, M., Legrand, D., y Monfret, T. (2009). The Mw 7.7 Tocopilla earthquake of 14 november 2007 at the southern edge of the northern Chile seismic gap: Rupture in the deep part of the coupled plate interface. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(1), 87–94.

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271.

Duckham, M., y Kulik, L. (2003). Simplest paths: Automated route selection for navigation. En W. Kuhn, M. F. Worboys, y S. Timpf (Eds.), *Spatial information theory. foundations of geographic information science: International conference, cosit 2003, kartause ittingen, switzerland, september 24-28, 2003. proceedings* (pp. 169–185). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Ercolano, J. (2008). Pedestrian disaster preparedness and emergency management of mass evacuations on foot: State-of-the-art and best practices. *Journal of Applied Security Research*, 3(3-4), 389–405.

Esteban, M., Tsimopoulou, V., Mikami, T., Yun, N., Suppasri, A., y Shibayama, T. (2013). Recent tsunamis events and preparedness: Development of tsunami awareness in Indonesia, Chile and Japan. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 5, 84–97.

Figueroa, O., y Fuentes, L. (2009). Chile: del país urbano al país metropolitano. En (cap. Expansión urbana y el desarrollo económico: el caso del sistema urbano Iquique - Alto Hospicio). Pontificia Universidad Católica de Chile.

Fraser, S., Raby, A., Pomonis, A., Goda, K., Chian, S. C., Macabuag, J., ... Sammonds, P. (2013). Tsunami damage to coastal defences and buildings in the march 11th 2011 Mw 9.0 Great East Japan earthquake and tsunami. *Bulletin of earthquake engineering*, 11(1), 205–239.

Fraser, S., Wood, N. J., Johnston, D., Leonard, G. S., Greening, P. D., y Rossetto, T. (2014). Variable population exposure and distributed travel speeds in least-cost tsunami evacuation modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 2975.

Freire, S., Aubrecht, C., y Wegscheider, S. (2013). Advancing tsunami risk assessment by improving spatio-temporal population exposure and evacuation modeling. *Natural hazards*, 68(3), 1311–1324.

Fritz, H. M., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., ... others (2011). Field survey of the 27 february 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168(11), 1989–2010.

Fujiyama, T., y Tyler, N. (2014). Pedestrian speeds on stairs: an initial step for a simulation model. En *Proceedings of 36th universities transport studies group conference, life science centre, newcastle upon tyne, jan 2004*.

GEBCO. (2014). *Gridded bathymetry data*. Descargado de http://www.gebco.net/data-and-products/gridded_bathymetry_data/

Guha-Sapir, D., Vos, F., Below, R., y Ponserre, S. (2011). *Annual disaster statistical review 2010: The numbers and trends (online)* (Inf. Téc.). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université catholique de Louvain – Brussels, Belgium.

Gusman, A. R., Murotani, S., Satake, K., Heidarzadeh, M., Gunawan, E., Watada, S., y Schurr, B. (2015). Fault slip distribution of the 2014 Iquique, Chile, earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 42(4), 1053–1060.

Gutiérrez, O., Tamburini, L., Vicentini, G., y Walker, R. (2016). *Guía de referencia para sistemas comunales de evacuación por tsunami* (Inf. Téc.). Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Ministerio de Vivienda y

Urbanismo, Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales and Ministerio de Energía.

Gwynne, S., Galea, E., Owen, M., Lawrence, P. J., Filippidis, L., y cols. (1999). A review of the methodologies used in evacuation modelling. *Fire and Materials*, 23(6), 383–388.

Hart, P. E., Nilsson, N. J., y Raphael, B. (1968, July). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107. doi: 10.1109/TSSC.1968.300136

Hayes, G. P., Herman, M. W., Barnhart, W. D., Furlong, K. P., Riquelme, S., Benz, H. M., ... Samsonov, S. (2014). Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), 295–298.

He, L. X., y Xu, S. N. (2012). Urban design strategies of public space based on danger stress response. *Advanced Materials Research*, 450, 1026–1031.

Helbing, D., Farkas, I., y Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407(6803), 487–490.

Hillier, B., Penn, A., Hanson, J., Grajewski, T., y Xu, J. (1993). Natural movement: Or, configuration and attraction in urban pedestrian movement. *Environment and Planning B: planning and design*, 20(1), 29–66.

Huerta, S. (2011). *Nómina de fallecidos por el tsunami del 27.02.2010* (Inf. Téc.). Fiscalía, Ministerio Público de Chile.

IMI, y ONEMI. (2013). *Plan de protección civil ante tsunami* (Inf. Téc.). Oficina Nacional de Emergencia and Ilustre Municipalidad de Iquique.

INE. (2012). *Resultados XVII censo de población* (Inf. Téc.). Instituto Nacional de Estadísticas.

- INE. (2015). *Encuesta anual de vehículos en circulación* (Inf. Téc.). Instituto Nacional de Estadísticas.
- Ishikawa, M. (2002). Landscape planning for a safe city. *Annals of Geophysics*, 45(6).
- Johnson, C., Lizarralde, G., y Davidson, C. H. (2006). A systems view of temporary housing projects in post-disaster reconstruction. *Construction Management and Economics*, 24(4), 367–378.
- Jongman, B., Ward, P. J., y Aerts, J. C. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22(4), 823–835.
- Kennedy, J., Ashmore, J., Babister, E., y Kelman, I. (2008). The meaning of ‘build back better’: evidence from post-tsunami Aceh and Sri Lanka. *Journal of contingencies and crisis management*, 16(1), 24–36.
- Khatib, O. (1990). Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. En G. T. Cox Ingemar J. and Wilfong (Ed.), *Autonomous robot vehicles* (pp. 396–404). New York, NY: Springer New York.
- Khew, Y. T. J., Jarzebski, M. P., Dyah, F., Gu, J., Esteban, M., Aránguiz, R., y Akiyama, T. (2015). Assessment of social perception on the contribution of hard-infrastructure for tsunami mitigation to coastal community resilience after the 2010 tsunami: Greater Concepcion area, Chile. *International journal of disaster risk reduction*, 13, 324–333.
- Kong, L. (2011). Post-tsunami field surveys are essential for mitigating the next tsunami disaster. *Oceanography*.
- Kron, W. (2013). Coasts: The high-risk areas of the world. *Natural hazards*, 66(3), 1363–1382.

- Lay, T., Yue, H., Brodsky, E. E., y An, C. (2014). The 1 april 2014 Iquique, Chile, Mw 8.1 earthquake rupture sequence. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3818–3825.
- León, J., y March, A. (2014). Urban morphology as a tool for supporting tsunami rapid resilience: A case study of Talcahuano, Chile. *Habitat International*, 43, 250–262.
- León, J., y March, A. (2016). An urban form response to disaster vulnerability: Improving tsunami evacuation in Iquique, Chile. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(5), 826–847.
- Lin, Q., Ji, Q., y Gong, S. (2006). A crowd evacuation system in emergency situation based on dynamics model. En *International conference on virtual systems and multimedia* (pp. 269–280).
- Lindell, M. K., y Prater, C. S. (2007). Critical behavioral assumptions in evacuation time estimate analysis for private vehicles: Examples from hurricane research and planning. *Journal of Urban Planning and Development*, 133(1), 18–29.
- Liu, L., Lin, Y., y Wang, S. (2014). Urban design for post-earthquake reconstruction: A case study of Wenchuan county, China. *Habitat International*, 41, 290–299.
- Liu, Z., Jacques, C., Szyniszewski, S., Guest, J., Schafer, B., Igusa, T., y Mitrani-Reiser, J. (2015). Agent-based simulation of building evacuation after an earthquake: Coupling human behavior with structural response. *Natural Hazards Review*, 17(1), 04015019.
- Lomnitz, C. (2004). Major earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*(n. 75), 368–375.

- Mas, E., Imamura, F., y Koshimura, S. (2011). Modeling the decision of evacuation from tsunami, based on human risk perception. En *Annual meeting of the Tohoku branch technology research conference, Japan society of civil engineers* (pp. 1–2).
- Mas, E., Imamura, F., y Koshimura, S. (2012). An agent based model for the tsunami evacuation simulation. a case study of the 2011 Great East Japan tsunami in Arahama town. En *9th international conference on urban earthquake, 4th asia conference on earthquake engineering* (pp. 1957–1964).
- Matus, J., y Muñoz, D. (2014, 18 de March). Onemi realiza crítico informe de simulacros por tsunami en el país. *La Tercera*.
- McCann, W., Nishenko, S., Sykes, L., y Krause, J. (1979). Seismic gaps and plate tectonics: Seismic potential for major boundaries. *Pure and Applied Geophysics*, 117(6), 1082–1147.
- Métois, M., Socquet, A., Vigny, C., Carrizo, D., Peyrat, S., Delorme, A., ... Ortega, I. (2013). Revisiting the north Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3), 1283–1294.
- MINVU. (2016). *Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones* (Inf. Téc.). Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Mordvintsev, A. S., Krzhizhanovskaya, V. V., Lees, M. H., y Sloat, P. M. A. (2014). Simulation of city evacuation coupled to flood dynamics. En U. Weidmann, U. Kirsch, y M. Schreckenberg (Eds.), *Pedestrian and evacuation dynamics 2012* (pp. 485–499). Cham: Springer International Publishing.
- Moreno, M., Melnick, D., Rosenau, M., Baez, J., Klotz, J., Oncken, O., ... others (2012). Toward understanding tectonic control on the Mw 8.8 2010 Maule Chile earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 321, 152–165.

Mori, N., Cox, D. T., Yasuda, T., y Mase, H. (2013). Overview of the 2011 Tohoku earthquake tsunami damage and its relation to coastal protection along the Sanriku coast. *Earthquake Spectra*, 29(s1), S127–S143.

Ndiaye, I. A., Neron, E., Linot, A., Monmarche, N., y Goerigk, M. (2014). A new model for macroscopic pedestrian evacuation planning with safety and duration criteria. *Transportation Research Procedia*, 2, 486 - 494. (The Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics 2014 (PED 2014), 22-24 October 2014, Delft, The Netherlands)

Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., y Nicholls, R. J. (2015). Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding—a global assessment. *PloS one*, 10(3), 1–34.

NOAA. (2014, April). *National data bouy center*. Descargado de <http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml> (Acceso: 2017-03-01)

Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75(4), 1135–1154.

Okal, E. A. (2015). The quest for wisdom: Lessons from 17 tsunamis, 2004–2014. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(2053), 20140370.

Ortega, M., y Catalán, P. (2017). *Incorporación de restricciones geológicas en escenarios de deslizamiento estocástico para el modelado de inundación por tsunamis: Aplicación al norte de Chile*. (Tesis de Master no publicada). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Parisi, D., y Dorso, C. (2005). Microscopic dynamics of pedestrian evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 354, 606–618.

Platt, R. H., Salvesen, D., y II, G. H. B. (2002). Rebuilding the North Carolina coast after hurricane Fran: Did public regulations matter? *Coastal Management*, 30(3), 249–269.

Poulos, A., y de la Llera, J. C. (2014). *Risk model of human evacuation under earthquake loads* (Tesis de Master no publicada). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

Poulos, A., de la Llera, J. C., y Mitrani-Reiser, J. (2017). Earthquake risk assessment of buildings accounting for human evacuation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 46(4), 561–583.

Preuss, J., Raad, P., y Bidoae, R. (2001). Tsunami research at the end of a critical decade. En (pp. 47–64). Springer.

Reyes, M., y Miura, F. (2016). A proposal for qualitative and quantitative analysis methods for vertical evacuation from a tsunami in coastal cities. En *Coastal management* (p. 97-107). ICE Publishing.

Rinne, T., Tillander, K., y Grönberg, P. (2010). Data collection and analysis of evacuation situations. *VTT Research Notes*, 2562.

Ritter, F. E., Schoelles, M. J., Quigley, K. S., y Klein, L. C. (2011). Determining the number of simulation runs: treating simulations as theories by not sampling their behavior. En L. Rothrock y S. Narayanan (Eds.), *Human-in-the-loop simulations: Methods and practice* (pp. 97–116). London: Springer London.

Riveros, J. (2014, 2 de April). Automovilistas iquiqueños no dejaban huir a pie. *Las Últimas Noticias*, 14.

Satake, K. (2014). Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami. *Geoscience Letters*, 1(1), 15.

- Satake, K., Aung, T. T., Sawai, Y., Okamura, Y., Win, K. S., Swe, W., ... others (2006). Tsunami heights and damage along the Myanmar coast from the december 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Earth, planets and space*, 58(2), 243–252.
- Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P. S., Gusman, A. R., Sunendar, H., Fujii, Y., ... Yulianto, E. (2013). Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling. *Pure and Applied Geophysics*, 170(9), 1567–1582.
- Scheer, S. J., Varela, V., y Eftychidis, G. (2012). A generic framework for tsunami evacuation planning. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 49, 79–91.
- Schmidtlein, M. C., y Wood, N. J. (2015). Sensitivity of tsunami evacuation modeling to direction and land cover assumptions. *Applied Geography*, 56, 154–163.
- Schurr, B., Asch, G., Hainzl, S., Bedford, J., Hoechner, A., Palo, M., ... others (2014). Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake. *Nature*, 512(7514), 299–302.
- SECTRA. (2010). *Encuesta de movilidad en centros urbanos* (Inf. Téc.). Secretaría de Planificación de Transportes. (<http://sintia.sectra.cl/>)
- Shuto, N. (2005). Tsunamis: Their coastal effects and defense works. En *Scientific forum on the tsunami, its impact and recovery* (pp. 1–12).
- Shuto, N., y Fujima, K. (2009). A short history of tsunami research and countermeasures in Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 85(8), 267–275.
- Solís, I. A., y Gazmuri, P. (2017). Evaluation of the risk and the evacuation policy in the case of a tsunami in the city of Iquique, Chile. *Natural Hazards*, 1–30.
- Soule, R. G., y Goldman, R. F. (1972). Terrain coefficients for energy cost prediction. *Journal of Applied Physiology*, 32(5), 706–708.

- Spaling, H., y Vroom, B. (2007). Environmental assessment after the 2004 tsunami: A case study, lessons and prospects. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 25(1), 43–52.
- Steinberg, F. (2007). Housing reconstruction and rehabilitation in Aceh and Nias, Indonesia rebuilding lives. *Habitat International*, 31(1), 150–166.
- Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E., y Yalciner, A. C. (2013). Lessons learned from the 2011 Great East Japan tsunami: Performance of tsunami countermeasures, coastal buildings, and tsunami evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 170(6-8), 993–1018.
- Tavares, R. M. (2009). Evacuation processes versus evacuation models: “quo vadimus”? *Fire Technology*, 45(4), 419–430.
- Tobler, W. (1993). *Three presentations on geographical analysis and modeling*. NCGIA.
- Tomita, T., Kumagai, K., Mokrani, C., Cienfuegos, R., y Matsui, H. (2016). Tsunami and seismic damage caused by the earthquake off Iquique, Chile, in april, 2014. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 10(02), 1640003.
- Tsuji, Y., Namegaya, Y., Matsumoto, H., Iwasaki, S.-I., Kanbua, W., Sriwichai, M., y Meesuk, V. (2006). The 2004 Indian tsunami in Thailand: Surveyed runup heights and tide gauge records. *Earth, planets and space*, 58(2), 223–232.
- Tweedie, S. W., Rowland, J. R., Walsh, S. J., Rhoten, R. P., y Hagle, P. I. (1986). A methodology for estimating emergency evacuation times. *The Social Science Journal*, 23(2), 189–204.
- UNESCO/IOC. (2014, April). *Sea level station monitoring facility*. Descargado de <http://ioc-sealevelmonitoring.org> (Acceso: 2017-03-01)

- Vanclooster, A., Ooms, K., Viaene, P., Fack, V., de Weghe, N. V., y Maeyer, P. D. (2014). Evaluating suitability of the least risk path algorithm to support cognitive wayfinding in indoor spaces: An empirical study. *Applied Geography*, 53, 128 - 140.
- Van den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., y Manocha, D. (2011). Reciprocal n-body collision avoidance. En C. Pradalier, R. Siegwart, y G. Hirzinger (Eds.), *Robotics research: The 14th international symposium isrr* (pp. 3–19). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Walker, J.-M. (2013). *Informe técnico de evaluación simulacro macrozona de terremoto y tsunami, evacuación del borde costero* (Inf. Téc.). Oficina Nacional de Emergencia.
- Wang, H., Mostafizi, A., Cramer, L. A., Cox, D., y Park, H. (2016). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 86 - 100.
- Wood, N. J., y Schmidlein, M. C. (2012). Anisotropic path modeling to assess pedestrian-evacuation potential from Cascadia-related tsunamis in the US pacific northwest. *Natural Hazards*, 62(2), 275–300.
- Xiaoping, Z., Tingkuan, Z., y Mengting, L. (2009). Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches. *Building and Environment*(n. 44), 437–445.
- Yagi, Y., Takahashi, T., Okumura, Y., y Aránguiz, R. (2014). Tsunami hazard estimation: Case of Iquique. En *Seminar on disaster mitigation for earthquake and tsunami countries of latin america, santiago, november 2014*.
- Yi, H., y Yang, J. (2014). Research trends of post disaster reconstruction: The past and the future. *Habitat International*, 42, 21–29.