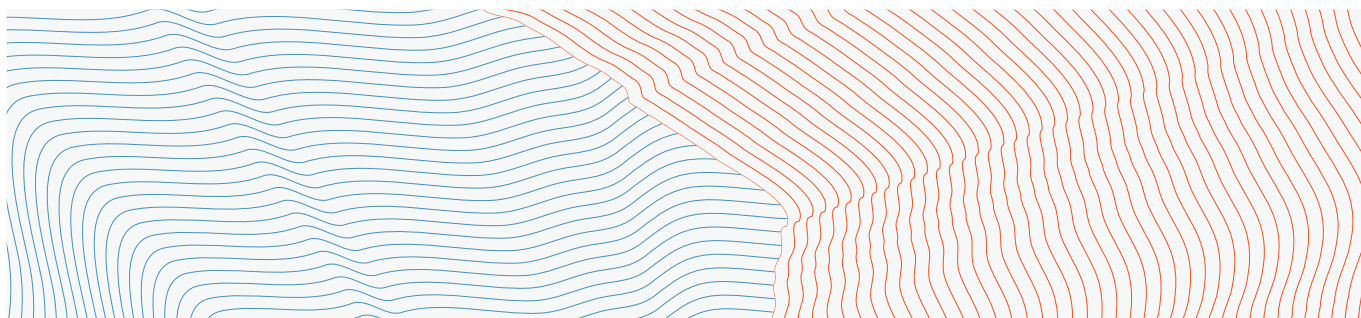
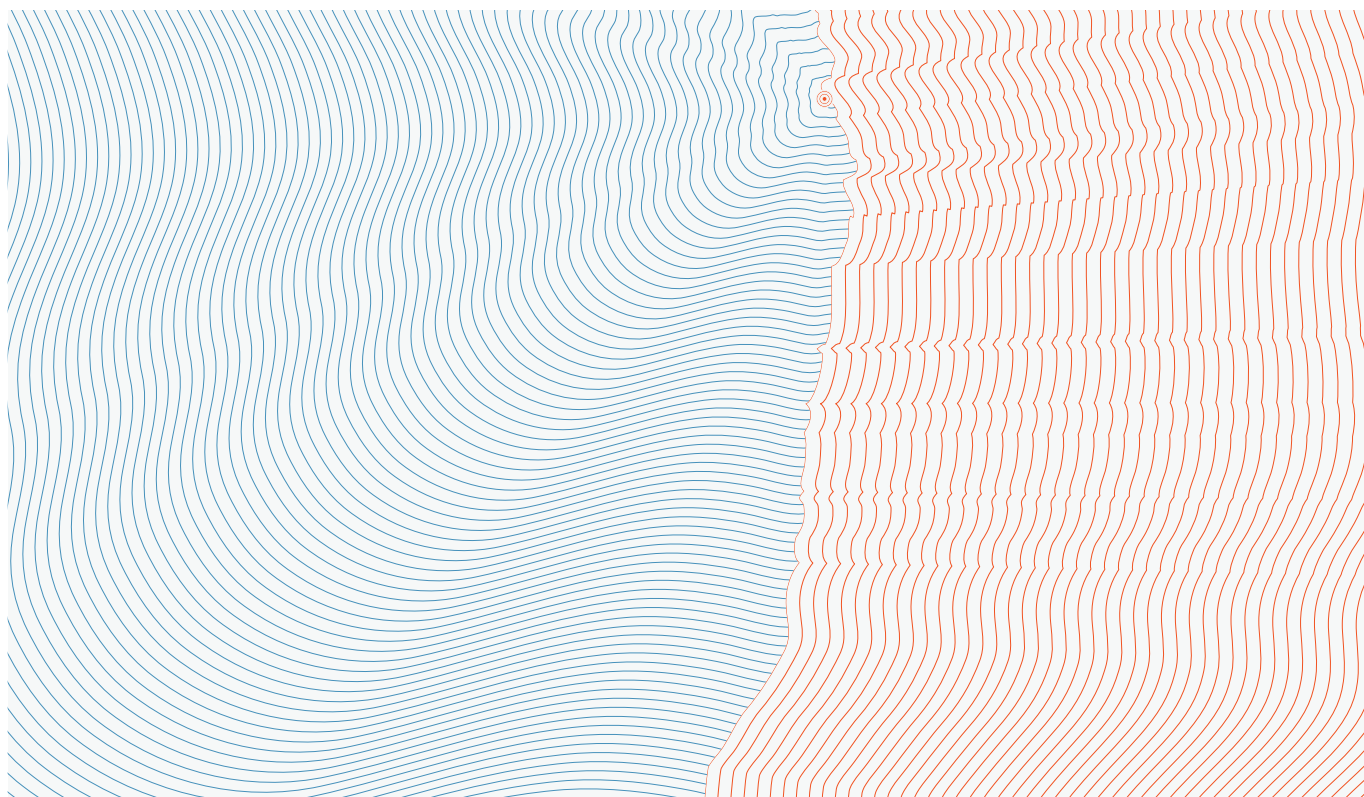




ELABORACIÓN DE UN ESCENARIO SÍSMICO EN IQUIQUE

Caracterización de un posible terremoto y sus
consecuencias en el entorno físico y social.



CIGIDEN

Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres

ELABORACIÓN DE UN ESCENARIO SÍSMICO EN IQUIQUE

Caracterización de un posible terremoto y sus
consecuencias en el entorno físico y social.

Noviembre, 2017

Primera Edición

CIGIDEN

Santiago, Chile

EDITOR GENERAL

Matías Hube, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

EDITOR ASOCIADO

Rodrigo Cienfuegos, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

COORDINADOR CIENTÍFICO

Orlando Arroyo, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

AUTORES

CAPÍTULO 2

Paula Aguirre, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Andrea Vásquez, M.U.P., Pontificia Universidad Católica de Chile

Edmundo Krönmüller, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Matías Hube, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Hernán Santa María, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Philomène Favier, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Jorge Vásquez, M.Sc., Pontificia Universidad Católica de Chile

CAPÍTULO 3

Juan González, Estudiante Doctoral, Universidad Católica del Norte

Gabriel González, Ph.D., Universidad Católica del Norte

Mahesh Shrivastava, Ph.D., Universidad Católica del Norte

CAPÍTULO 4

Rafael Aránguiz, Ph.D., Universidad Católica de la Santísima Concepción

Rodrigo Cienfuegos, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Alejandro Urrutia, M.Sc., Pontificia Universidad Católica

Patricio Catalán, Ph.D., Universidad Técnica Federico Santa María

CAPÍTULO 5

Paula Aguirre, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

Jorge Vásquez, M.Sc., Pontificia Universidad Católica de Chile

CAPÍTULO 6

Jorge León, Ph.D., Universidad Técnica Federico Santa María

Sebastián Castro, M.Sc., Pontificia Universidad Católica de Chile

Alan Poulos, M.Sc., Pontificia Universidad Católica de Chile

Juan Carlos de la Llera, Ph.D., Pontificia Universidad Católica de Chile

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Sebastián Saldaña, Diseñador, Pontificia Universidad Católica de Chile

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	7
2. CONTEXTO FÍSICO Y SOCIAL	9
3. ESCENARIO SÍSMICO	17
4. ESCENARIO DE TSUNAMI.....	25
5. IMPACTO DIRECTO AL ENTORNO FÍSICO Y SOCIAL	35
6. EVACUACIÓN	41
7. CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS	53

1 INTRODUCCIÓN

Resulta imposible predecir cuándo ocurrirá el siguiente gran terremoto en Chile, pero existe certeza de que sucederá en algún momento. Por lo tanto, prepararse para las posibles consecuencias puede reducir las fatalidades y facilitar la recuperación social y económica del país.

Una estrategia eficaz de prepararse para un terremoto extremo es mediante la generación de escenarios sísmicos. En un escenario sísmico se simula el efecto que tendría un potencial terremoto en un lugar específico. Se estima el movimiento del suelo y el efecto que éste tendría en las edificaciones, líneas vitales (agua, electricidad), infraestructura crítica (hospitales, colegios, estaciones de carabineros, etc.) y sistemas de comunicaciones y transporte. Adicionalmente, se simula la generación de un tsunami y sus posibles efectos. De esta manera, un escenario sísmico se convierte en una herramienta de planificación que permite establecer estrategias para afrontar las potenciales consecuencias de un terremoto, ayudando a minimizar su impacto sobre la sociedad. A nivel mundial, ciudades como Seattle, Nueva York y el estado de California cuentan con escenarios sísmicos que han permitido formular medidas orientadas a mitigar las consecuencias de un potencial terremoto.

Este documento presenta un escenario sísmico donde se simula un potencial terremoto cercano a la ciudad de Iquique en el norte de Chile. En esta zona existe una de las lagunas sísmicas más grandes del Pacífico y que no ha experimentado un terremoto de magnitud mayor a Mw 8,5 desde 1868. En consecuencia, la energía sísmica acu-

mulada en esta zona de convergencia de placas tectónicas podría generar un terremoto de magnitud Mw 8,9, con una duración potencial estimada de 200 segundos.

Las estimaciones y recomendaciones presentadas en este reporte pretenden servir de guía para el desarrollo de políticas y planes, que permitan que Iquique sea una Ciudad más segura y resiliente durante futuros terremotos. Las pérdidas e impactos descritos en las siguientes páginas son estimaciones de lo que podría ocurrir en un posible terremoto y *en ningún caso son predicciones exactas*. La selección de un terremoto de magnitud Mw 8,9 para el escenario sísmico de este documento permite situarse en una situación extrema a la cual podría enfrentarse la ciudad de Iquique, permitiendo también estimar el impacto de un posible tsunami y las potenciales réplicas después del evento principal.

El presente documento es el resultado de un trabajo multidisciplinario realizado por CIGIDEN, donde se combinan las contribuciones de distintas líneas de investigación de este Centro. El reporte se encuentra estructurado por capítulos, los cuales incluyen una descripción del contexto físico y social de la ciudad de Iquique, seguidos por la descripción de un posible escenario sísmico y de la inundación que podría generar un tsunami. Adicionalmente, se presenta una estimación del impacto generado al entorno y se muestran los resultados de las simulaciones de evacuación de la ciudad. Finalmente se presentan las conclusiones obtenidas del escenario sísmico simulado en este documento.

2 CONTEXTO FÍSICO Y SOCIAL

Una simulación realista de los posibles efectos de un escenario sísmico depende críticamente del inventario disponible de los elementos en riesgo, el cual se conoce como modelo de exposición. Su nivel de completitud y detalle son clave para la estimación acertada de daños y pérdidas. En el caso de Iquique se utilizó un extenso conjunto de datos públicos, a escala nacional y local, para construir un inventario del entorno físico y social expuesto a la amenaza sísmica, el cual se detalla en esta sección.

2.1 CONTEXTO FÍSICO

La elaboración de un modelo de exposición del entorno físico consiste en determinar los tipos de edificaciones existentes y cuáles son sus principales características asociadas a la amenaza que se está evaluando. Un modelo de exposición debiese considerar los siguientes campos:

- Infraestructura general, compuesta por edificaciones residenciales, comerciales e industriales.
- Infraestructura crítica, que corresponde a las instalaciones que proveen servicios esenciales a la población en caso de emergencia y por lo tanto son críticas desde la perspectiva de respuesta y recuperación a corto plazo. Se considera a hospitales, centros educacionales, estaciones de bomberos, estaciones de carabineros y dependencias de gendarmería entre otras.
- Sistema de transporte, que se compone de caminos, carreteras, puertos y aeropuertos.
- Líneas vitales, que corresponden a la infraestructura requerida para prestar servicios de agua potable, alcantarillado, red eléctrica y telefonía.

2.1.1 Edificaciones Residenciales, Comerciales e Industriales

Para analizar las consecuencias de un escenario sísmico

sobre el conjunto general de edificaciones existentes en Iquique se elaboró un completo inventario de edificaciones que compila las de tipo residencial, comercial e industrial agregadas a nivel de manzanas censales. La identificación de manzanas y predios se obtuvo de un mapa digital de manzanas censales de la ciudad de Iquique, publicado por el Ministerio de Bienes Nacionales a través de IDE Chile (Ministerio de Economía 2015).

Para la elaboración del inventario de las edificaciones en Iquique se utilizó la base catastral del Servicio de Impuestos Internos (SII), con datos actualizados a enero de 2015 (SII 2015). La base de datos del SII registra un código, dirección, manzana, predio y avalúo fiscal para cada propiedad contribuyente. Adicionalmente, detalla información respecto al uso, materialidad, nivel de calidad y metraje de cada construcción dentro de la propiedad. Esta información fue complementada con el inventario de viviendas sociales del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), que indica la ubicación, año de construcción y características estructurales de conjuntos habitacionales bajo su tutela (MINVU 2014; MINVU 2014b).

Combinando ambos conjuntos de datos, se contabilizan 33.386 edificaciones en la ciudad de Iquique. De acuerdo

al uso, 88,4% de las edificaciones son de tipo residencial, 10,2% comercial, 0,7% educacional, 0,4% industrial, 0,2% religioso y 0,07% gubernamental (Figura 2.1).

Para estimar los daños físicos que podría causar un terremoto, las edificaciones son clasificadas de acuerdo a su materialidad, sistema estructural, rango de altura y nivel de diseño en 14 tipologías constructivas, según lo definido en la metodología de estimación de daños del programa HAZUS (FEMA 2015). Los tipos de construcción más frecuentes en Iquique son las estructuras de albañilería reforzada (46,7%) y madera (27,1%). También se encuentran en porcentajes menores construcciones de hormigón armado, perfiles metálicos, acero y adobe (Figura 2.1).

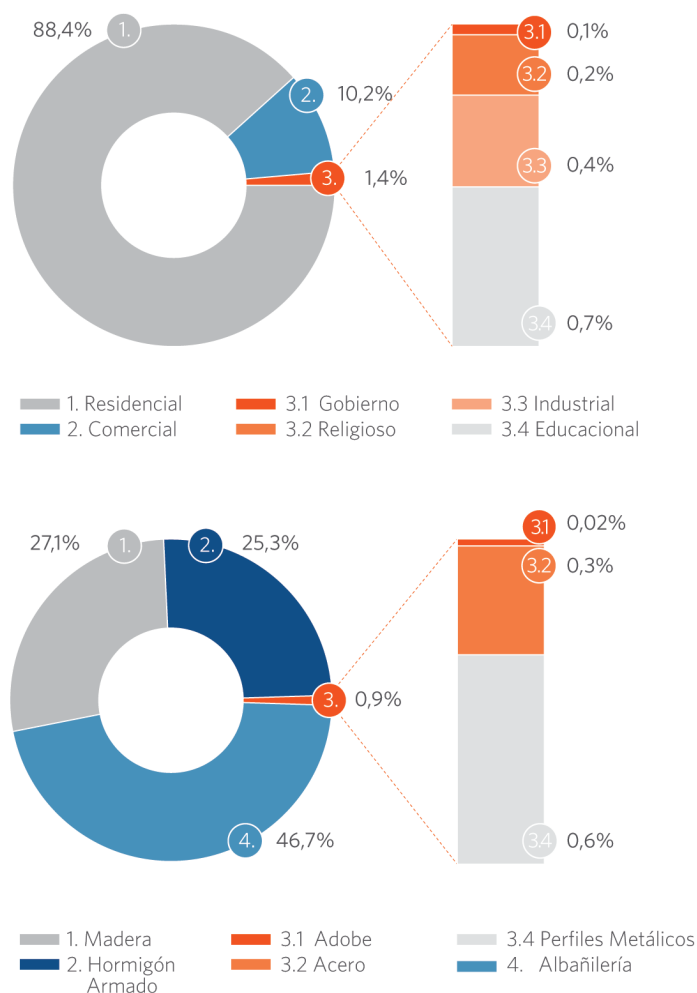
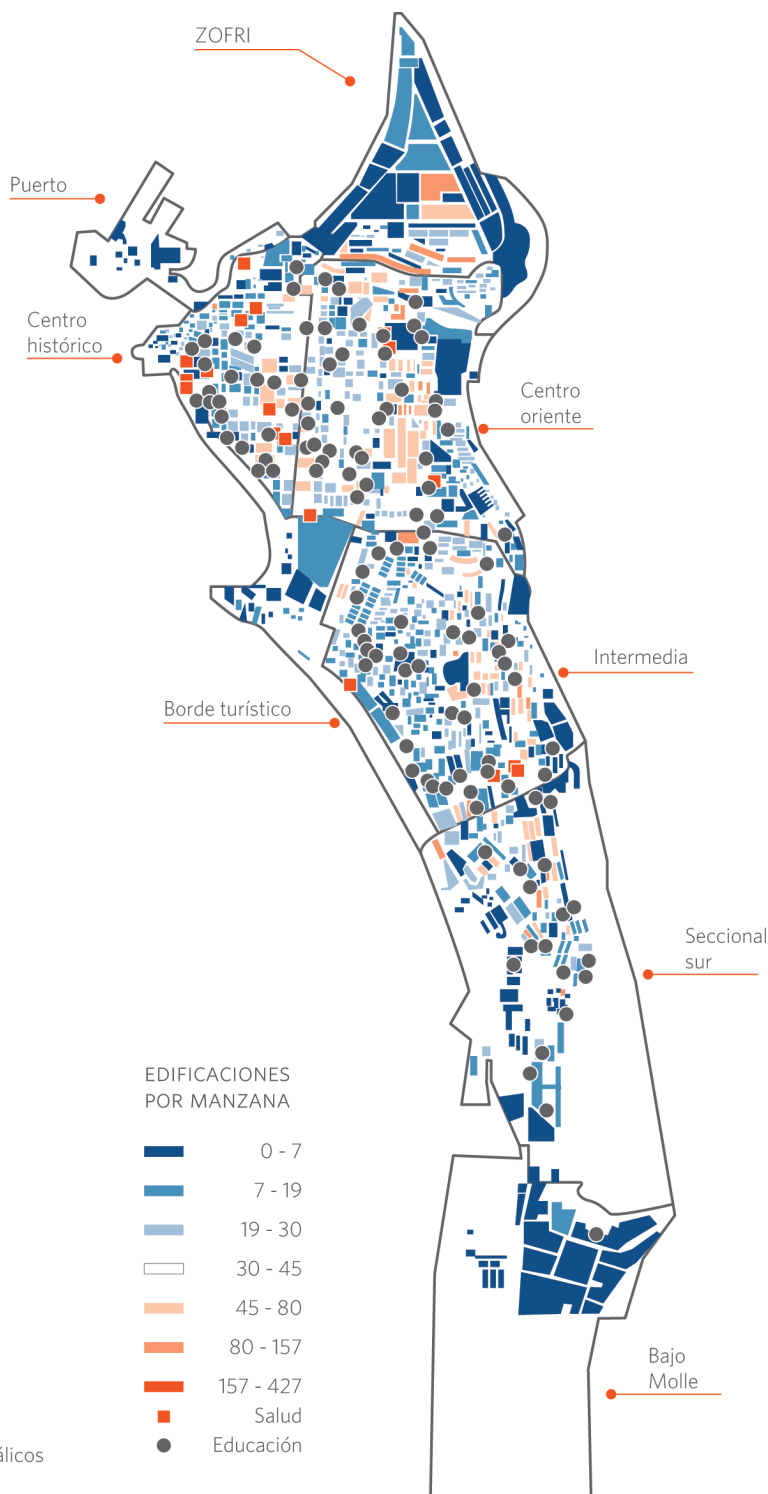


Figura 2.1

Inventario general de edificaciones para Iquique. Los gráficos a la izquierda muestran la distribución de edificaciones por clase general de ocupación y materialidad. El mapa a la derecha muestra la subdivisión de la ciudad en macrozonas y manzanas. El número total de edificaciones por cada una de ellas se indica en escala de color.



Un segundo modelo de exposición fue construido por Santa María et al. (2017) utilizando datos censales y permisos de edificación. Este modelo considera las edificaciones residenciales de todo Chile y a nivel de manzana censal. El modelo considera 18 tipologías constructivas diferentes y contiene el número de edificaciones, los metros cuadrados y el costo de reposición de cada una de las tipologías. Para la región de Tarapacá, el modelo indica que existen 50.567 edificaciones residenciales, de las cuales 31.956 están en la comuna de Iquique y 12.555 en la comuna de Alto Hospicio. La Figura 2.2 muestra la distribución de tipologías estructurales en las comunas de la región de Tarapacá.

2.1.2 Red de Salud

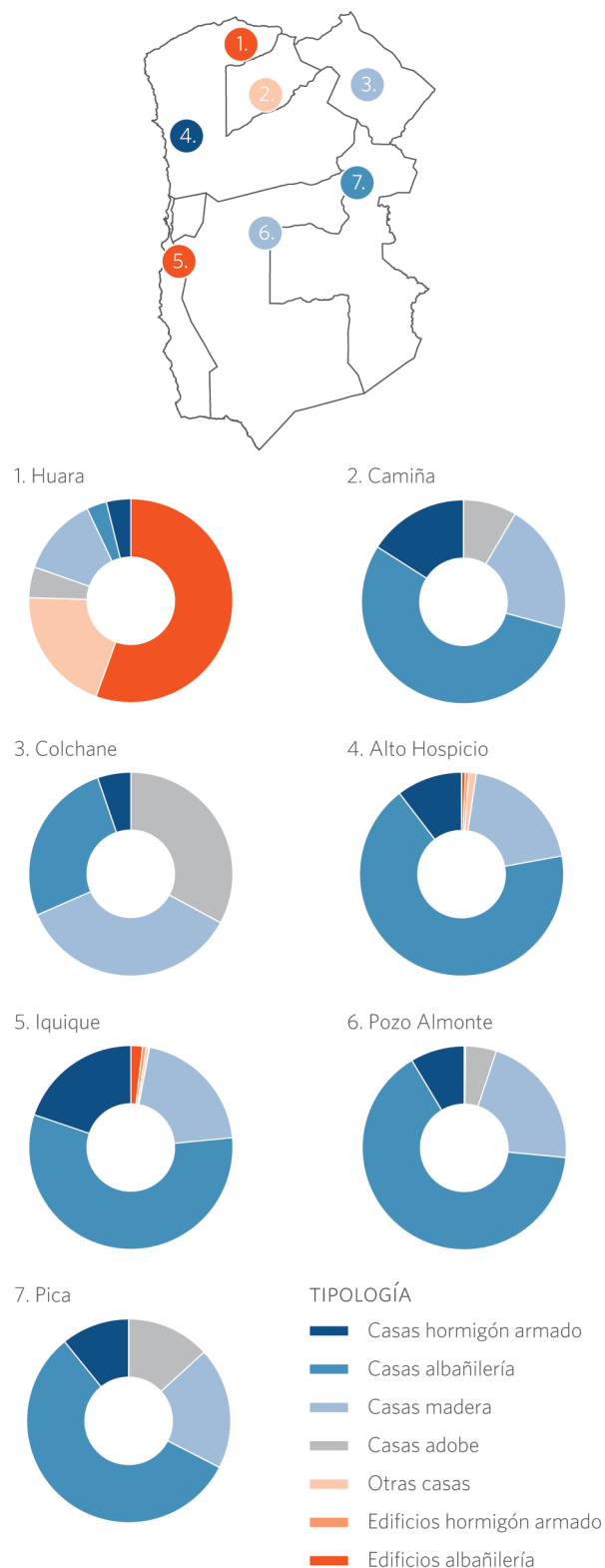
El sistema de salud de Chile tiene una composición mixta, donde coexisten prestadores públicos y privados. En términos generales, 80% de la población chilena se encuentra inscrita en el Fondo Nacional de Salud (FONASA); en el caso de Iquique, la cifra es del 90% de los habitantes.

La red de salud de Iquique está compuesta por siete centros de salud, entre los cuales se consideran los centros de atención primaria, el hospital y las clínicas privadas. Este número no incluye los laboratorios clínicos ni los centros de atención de salud específicos para trabajadores (Mutual) o fuerzas armadas.

De los siete centros de salud, dos son clínicas privadas ubicadas en zona de peligro de inundación por tsunami (Clínica Tarapacá y Clínica Iquique). Otros cuatro son de atención primaria, entre los cuales dos se encontraban en zona de inundación durante el terremoto de Pisagua y uno de ellos fue reubicado a zona segura posterior al evento (CESFAM Videla). Finalmente, el hospital Dr. Ernesto Torres Galdames está ubicado en zona segura, por encima de los 30 m sobre el nivel del mar. Éste es un hospital basal de alta complejidad, único en la Región de Tarapacá, que cuenta con 372 camas (Ministerio de salud 2011) y un total de 112.890 egresos hospitalarios anuales según datos del Ministerio de Salud (2013).

Figura 2.2

Distribución de edificaciones residenciales según tipología estructural para la región de Tarapacá.



Descripción de los centros de atención primaria de salud

Los centros de atención primaria de salud sólo prestan atenciones ambulatorias y se encuentran orientados a medicina preventiva. En Iquique, estos centros realizaron un total de 173.341 atenciones el año 2012 (Ministerio de Salud 2012) y se distribuyen territorialmente en la ciudad, atendiendo cada uno a un número similar de población (cerca de 40.000 inscritos por centro). Estos establecimientos funcionan como Centros de Salud Familiar, o CESFAM, durante el día, y como Servicio de Atención Primaria de Urgencia, o SAPU, durante la noche. Los SAPU tienen la función de estabilizar a un paciente de urgencia y cada uno funciona con al menos un médico, un enfermero, un auxiliar, un conductor de ambulancia y un funcionario administrativo. Las dotaciones de boxes varían de tres a ocho y cada SAPU cuenta con una sala de reanimación. El paciente que ingresa a SAPU, luego de haber recibido atención médica puede ser derivado al Consultorio de Especialidades Médicas (adornado al Hospital), a su domicilio o al Hospital a través de traslado interno mediante ambulancia.

Importancia de la red de salud en contexto de eventos extremos

La experiencia durante el terremoto de Pisagua de 2014 mostró, en caso de un evento extremo, que la red de salud pública puede terminar prestando atención a toda la población de la región. Para este evento, los pacientes de las dos clínicas fueron evacuados debido a la alarma de tsunami y llegaron a los centros de atención primaria de salud (Vásquez et al. 2017).

2.1.3 Centros Educativos

La ciudad de Iquique cuenta con un total de 168 establecimientos educativos de nivel preescolar y escolar, de los cuales 143 corresponden a establecimientos escolares diurnos y vespertinos, y 25 a jardines infantiles. El total de matrículas en estos establecimientos en el año 2014 fue de 13.964 (Seremi Educación Iquique). De éstas, el 16% (2.302) corresponden a matrículas preescolares en jardines infantiles y el resto a establecimientos de nivel

escolar. El 60% (8.427) de las matrículas corresponde a establecimientos particulares subvencionados, 20% (2.752) a establecimientos municipales y el 4% restante (483) a colegios particulares pagados. De los 168 establecimientos educativos de la ciudad de Iquique, el 57% (97) se encuentran bajo la cota de inundación por tsunami.

2.1.4 Otra infraestructura crítica

Bomberos

Iquique cuenta con nueve cuarteles de bomberos distribuidos a lo largo de la ciudad, de los cuales ocho se encuentran bajo la cota de inundación por tsunami definida en 30 metros sobre el nivel del mar.

Carabineros

La ciudad cuenta con tres comisarías de carabineros, de las cuales dos se encuentran bajo la cota de inundación por tsunami.

Gendarmería

En la ciudad de Iquique hay siete dependencias de Gendarmería, de las cuales cinco se encuentran bajo la cota de inundación. Las dependencias ubicadas en zona de riesgo por tsunami son: Centro de Cumplimiento Penitenciario de Iquique, Centro de Reinserción Social de Iquique, Dirección Regional de Gendarmería Tarapacá, Patronato Local de Reos de Iquique y Unidad de Servicio Especiales Penitenciarios de Iquique. Quedan fuera de la zona de riesgo el Centro Especial de Adiestramiento Canino de Iquique, Centro de Internación Provisoria y Centro Régimen Cerrado Iquique.

Al identificar la infraestructura crítica de Bomberos, Carabineros y Gendarmería de Iquique, se constata que parte importante de ella se encuentra ubicada bajo la cota de inundación por tsunami.

2.2 CONTEXTO SOCIAL

La caracterización del contexto social implica conocer la demografía y los traslados de la población durante el día. Adicionalmente, se utiliza el concepto de vulnerabilidad social para caracterizar la población expuesta a desastres.

2.2.1 Caracterización Demográfica

La población permanente de Iquique se caracterizó con los datos del Censo 2012 (INE 2012), el cual tiene una tasa de omisión nacional estimada en 9,3% (Bravo et al. 2013). Esta tasa de omisión es significativamente menor al 26,3% de crecimiento estimado para la población de la región de Tarapacá desde el anterior Censo 2002 (INE 2014). En consecuencia, se utilizan los datos del Censo 2012 para describir la población total, y la distribución por edad y sexo a nivel de manzanas censales.

La información demográfica es necesaria para estimar la cantidad de lesionados de distinta gravedad que podrían registrarse como consecuencia de un sismo y/o tsunami. Adicionalmente, la población se moviliza a lo largo del día, y por lo tanto la estimación de población afectada por un posible evento dependerá de la hora a la que se produzca. La información censal permite caracterizar la población residente en Iquique, por lo que se considera adecuada para estimar los posibles afectados en caso de un terremoto nocturno. Si el evento ocurre durante un día hábil (por ejemplo, a las 11.00 horas), es necesario conocer la ubicación de la población a la hora de ocurrencia. Para estimar la distribución de la población durante el día se utilizaron los resultados de la Encuesta Origen-Destino (EOD) del Ministerio de Transporte (APPIA XXI 2012). Esta encuesta fue realizada en Iquique el año 2010 como parte de un plan amplio de modernización del transporte urbano, y recoge información sobre el número y motivo de los viajes realizados entre macrozonas de Iquique (Figura 2.1) y sus alrededores en cuatro horarios del día. Considerando los traslados de la hora punta matutina (7:30-8:30 AM) se puede estimar la población esperada en distintos lugares de la ciudad hasta aproximadamente mediodía (asumiendo

que las personas se quedan en ese lugar después del traslado). Para cada macrozona de Iquique se distingue entre población residente de día y aquella que se desplaza a la macrozona por motivos educacionales o laborales. La estimación de la población diurna en ocho macrozonas de Iquique se resume en la Tabla 2.1. Para estimar el riesgo, la población de cada macrozona se puede dividir de acuerdo al número relativo de edificaciones residenciales, comerciales y educacionales en cada una de ellas.

2.2.2 Vulnerabilidad Social

En el contexto de desastres de origen natural, la vulnerabilidad social se asocia a las pérdidas potenciales por parte de los individuos y las comunidades cuando se enfrentan a uno de estos eventos (Armas y Gavris 2013). Diversos autores coinciden que la vulnerabilidad social es una característica multidimensional que va más allá de una definición social e individual, viéndose afectada por factores económicos, materiales, físicos y del entorno. Estos diferentes factores generan que los desastres de origen natural afecten de diferente manera a distinta población.

Grupos vulnerables ante este tipo de desastres son mujeres, niños, adultos mayores y personas con discapacidad (Blaikie et al. 1994; Enarson y Scanlon 1999; Morrow y Phillips 1999; Fothergill 1996; Peacock et al. 1997; Cutter et al. 1996). En el caso de las mujeres, su rol como cuidador dentro y fuera de la familia aumenta después de ocurrido un desastre natural. Por otro lado, los niños y adultos mayores tienen una menor capacidad de respuesta inmediata durante un evento debido a su dependencia de otras personas. En particular, los adultos mayores pueden presentar problemas de movilidad, audición y otras limitaciones físicas que podrían interferir en la recepción de mensajes de alerta y en la conducta de evacuación en casos de inundaciones y tsunamis (Hewitt 1997; Mileti y O'Brien 1992; Cutter et al. 2000; Ngo 2012). Adicionalmente, cerca del 80% de los adultos mayores presenta alguna

Tabla 2.1

Población permanente (Censo 2012) y población diurna para macrozonas de Iquique.

	Censo 2012	POBLACIÓN DIURNA			
		Residente	Laboral	Estudiante	TOTAL
Bajo Molle	2.392	303	809	2.601	3.735
Borde Turístico	5.633	2.149	1.300	606	4.079
Centro Histórico	19.455	14.847	11.049	11.831	37.950
Centro Oriente	66.266	42.566	6.689	6.524	56.109
Industrial Zofri	251	63	4.855	0	4.947
Intermedia	55.964	38.689	6.488	12.357	57.874
Puerto	1.339	0	757	0	690
Seccional Sur	28.740	14.240	1.236	5.425	21.025
TOTAL	180.040	112.786	33.183	39.344	186.409

enfermedad crónica que puede interferir en el proceso de preparación, respuesta y recuperación frente a un desastre natural (Aldrich y Benson 2005).

Las personas con discapacidad, así como los pacientes crónicos, son reconocidos como otro grupo vulnerable en situaciones de desastre. Investigaciones sugieren que este grupo necesita de la ayuda de terceros para responder de manera efectiva en estas situaciones (McGuire et al. 2007; White et al. 2007; Rosenkoetter et al. 2007). Para el caso de pacientes crónicos, los potenciales fallos en servicios básicos de salud durante un desastre de origen natural traen consigo la intensificación de los síntomas de sus distintas condiciones (Aldrich y Benson 2005).

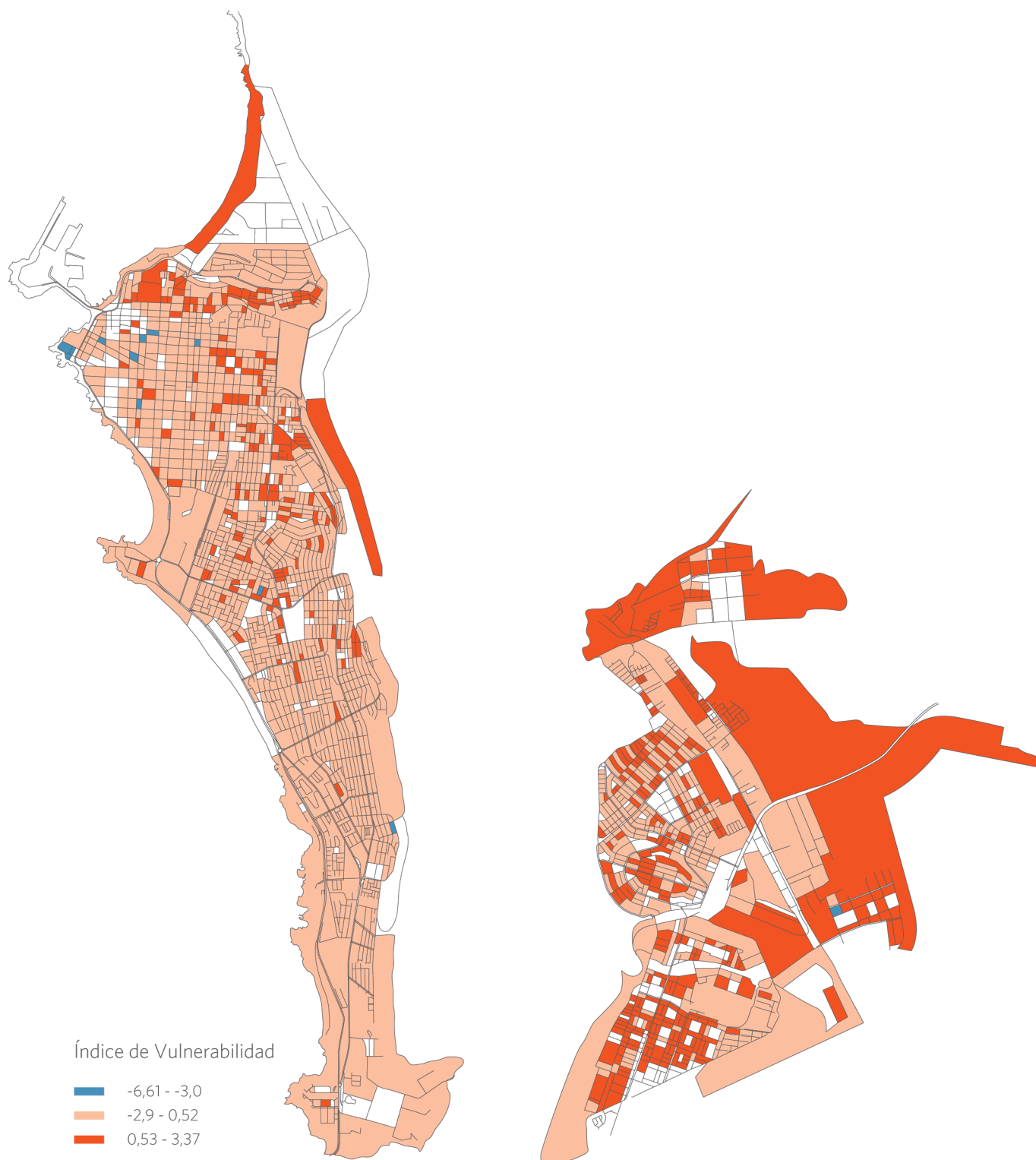
Otros grupos que se reconocen como vulnerables ante desastres son los inmigrantes y las minorías étnicas. Las investigaciones acerca del impacto de los desastres en estos grupos son limitadas. Collins et al. (2013) plantea que la probabilidad de que estos grupos respondan de manera efectiva frente a señales de alarma y evacuación es reducida. Adicionalmente, estos grupos presentan mayores problemas de salud física y mental después del desastre debido a limitaciones de idioma y dificultades para acceder al sistema de salud.

Para construir un índice de vulnerabilidad social ante desastres, en CIGIDEN se ha trabajado con dos macro in-

dicadores de información georeferenciada. El primer macro indicador considera variables demográficas, económicas y de vivienda. Las variables demográficas consideran la proporción de adultos mayores, mujeres, niños y mujeres con tres o más hijos. Las variables económicas consideran la proporción de asalariados, población económicamente pasiva (menor a 10 años y mayor de 65 años) y proporción de población mayor de 10 años con escolaridad hasta la educación básica. Las variables de vivienda consideran el número de personas por hogar y el número de personas por pieza. El índice de vulnerabilidad social calculado para Iquique y Alto Hospicio con el primer macro indicador se muestra en la Figura 2.3. En esta figura, los mayores valores del índice (zonas de color naranja intenso) representan las zonas con mayor vulnerabilidad social. Estas zonas están ubicadas en la zona norte de la ciudad y en los faldeos del cerro Dragón. El segundo macro indicador está relacionado con la población inmigrante en Iquique, y considera su nivel educacional, tasa de desempleo y la discapacidad. Más información sobre este indicador está disponible en Vásquez y Kronmüller (2015).

Figura 2.3

Vulnerabilidad social de la población total de Iquique
(Vásquez y Kronmüller 2015).



3 ESCENARIO SÍSMICO

Este capítulo caracteriza el terremoto extremo considerado en este documento y describe la metodología empleada para definir este evento. Las características del terremoto extremo se obtuvieron del análisis de la sismicidad histórica, y de la interpretación de los modelos de acoplamiento geodésicos. El escenario sísmico estimado tiene su centroide al sur de la ciudad de Iquique (70,68°W; 22,05°S), con una magnitud de momento de 8,9 y una duración estimada de 200 segundos. Adicionalmente, este capítulo identifica el área de ruptura, la distribución del deslizamiento y la magnitud máxima de una réplica. Utilizando las características de este escenario, al final de este capítulo se describe un mapa con la predicción de la aceleración máxima horizontal del suelo para la ciudad de Iquique. Esta aceleración máxima del suelo es la que permite estimar el posible impacto en la infraestructura.

3.1 MARCO GEOTECTÓNICO

La fuente de los grandes terremotos en el norte de Chile y sur del Perú es una megafalla inclinada hacia el este que forma el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana. Esta falla se extiende desde el norte de Colombia hasta la Península de Taitao en el extremo sur de Chile. A lo largo de esta falla, la Placa de Nazca desliza bajo la Sudamericana a una velocidad entre 62 a 63 mm/año (Chlieh *et al.* 2011; Kendrick *et al.* 2003). El deslizamiento de estas placas no ocurre de manera continua y la mayor parte del tiempo estas placas se encuentran trabadas en distintas zonas de la interface de contacto. Debido a este deslizamiento discontinuo, la interface de contacto acumula esfuerzo en los periodos de trabamiento y libera súbitamente estos esfuerzos en los instantes en que el contacto se destraba. Esta súbita liberación de energía es la que genera los denominados terremotos de subducción. En consecuencia, los terremotos pueden ser considerados como parte de un proceso cíclico, de carga lenta de energía, durante una fase denominada intersísmica, y una fase de liberación abrupta de la energía denominada fase cosísmica.

La región costera de Sudamérica comprendida entre los puertos de Ilo en el sur del Perú y Mejillones en el norte

de Chile podría experimentar un terremoto de subducción de grandes proporciones. Esta región ha sido considerada como una de las lagunas sísmicas más importantes de la cuenca del Pacífico (Nishenko 1985; Comte & Pardo 1991). La región no ha experimentado un sismo de magnitud de momento (M_w) mayor a 8,5 desde 1868 en el sur del Perú y desde 1877 en el norte de Chile (Figura 3.1, página siguiente). Ambos terremotos fueron seguidos de grandes tsunamis que devastaron las ciudades costeras de Arica, Iquique, Tocopilla, Cobija y Mejillones. En tiempos más recientes cuatro terremotos de magnitudes moderadas se registraron en esta laguna sísmica: Antofagasta, el año 1995 (M_w 8,1), Arequipa el 2001 (M_w 8,4), Tocopilla el 2007 (M_w 7,7) y Pisagua el 2014 (M_w 8,1). El terremoto de Pisagua de 2014 liberó aproximadamente el 20% de la energía sísmica acumulada desde 1877 en esta región del norte de Chile (Schurr *et al.* 2014), dejando una energía acumulada capaz de generar un terremoto de M_w 8,9, como se describe más adelante.

La gran falla de subducción en la región considerada se inicia costa afuera, en una gran fosa submarina localizada a 148 km de la costa en Arica y 73 km en frente de la Península de

Mejillones. La falla de subducción se extiende hacia el este, por debajo de la zona volcánica andina. La porción costa afuera, entre la fosa y la línea de costa es la parte donde el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana se encuentra trabado. En consecuencia, éste es el lugar donde se generan los grandes terremotos de subducción.

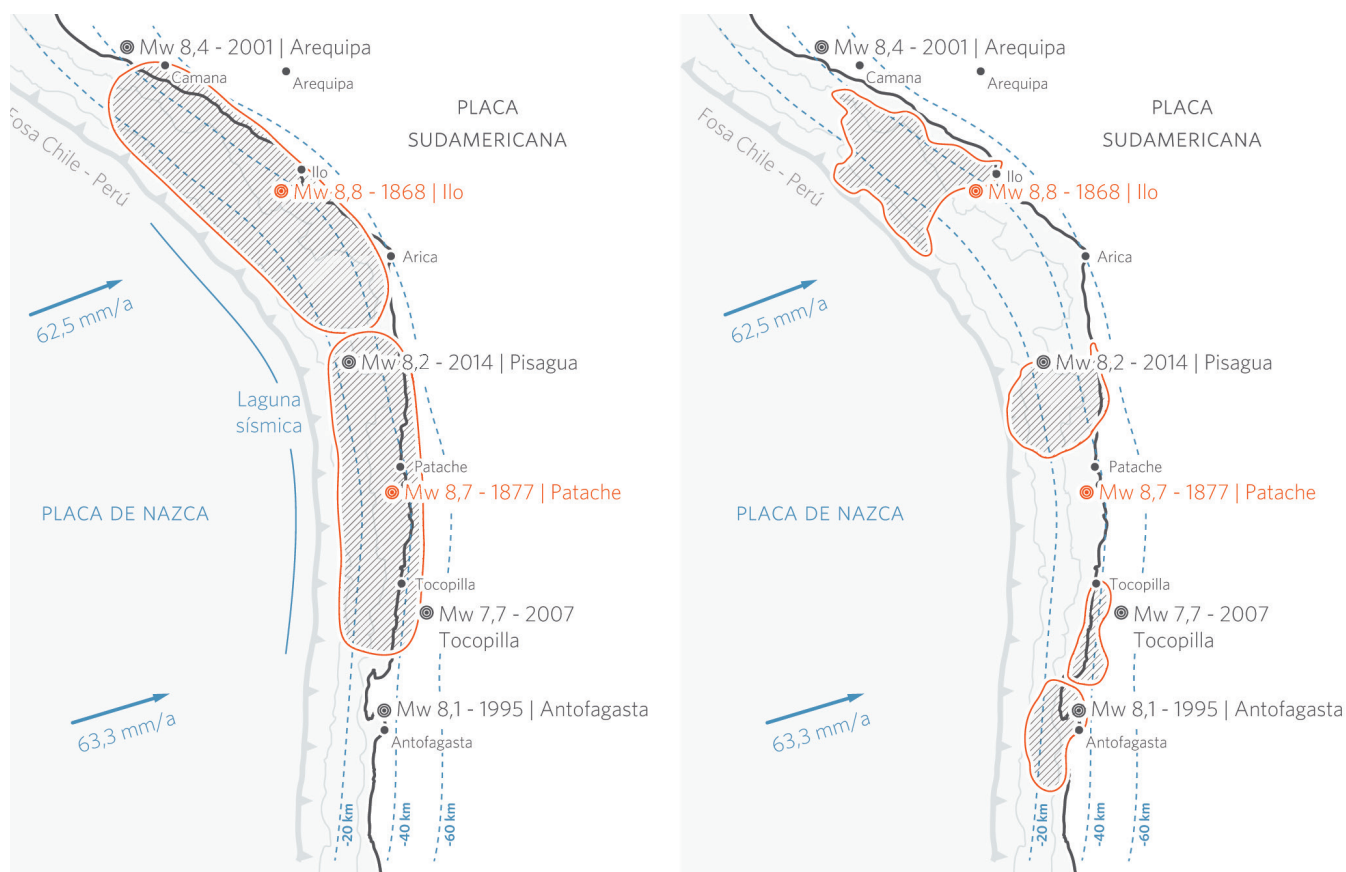
El término acoplamiento es usado para referirse al grado de trabamiento de las placas tectónicas en su interface. Un valor de 1 indica que el bloqueo o trabamiento es completo y aplica para la fase intersísmica, que es el periodo de tiempo comprendido entre dos eventos sísmicos y donde las placas no experimentan deslizamiento en su interface. Un

valor de acoplamiento cero indica que las placas deslizan libremente en su interface a una velocidad similar a la de la convergencia de placas. La distinción entre zona completamente acoplada y parcialmente acoplada es importante para la identificación de posibles zonas de generación de terremotos tsunamigénicos. Las zonas de acoplamiento alto representan zonas de asperezas que acumulan, en la fase intersísmica, la mayor parte del déficit de deslizamiento y por lo tanto son zonas que potencialmente pueden concentrar el deslizamiento cosísmico durante futuros terremotos. Las zonas de acoplamiento reducido representan barreras donde la propagación de terremotos puede detenerse.

Figura 3.1.

a) Distribución de las áreas de ruptura de los terremotos históricos de mayor magnitud ocurrido en el norte de Chile.

b) Terremotos recientes ocurridos en el sur del Perú y Norte de Chile.



(Elaboración propia basada en datos de sismicidad histórica de Comte & Pardo 1991; Chlieh et al. 2004; Pritchard et al. 2007; Béjar-Pizarro et al. 2010; Yagi et al. 2014).

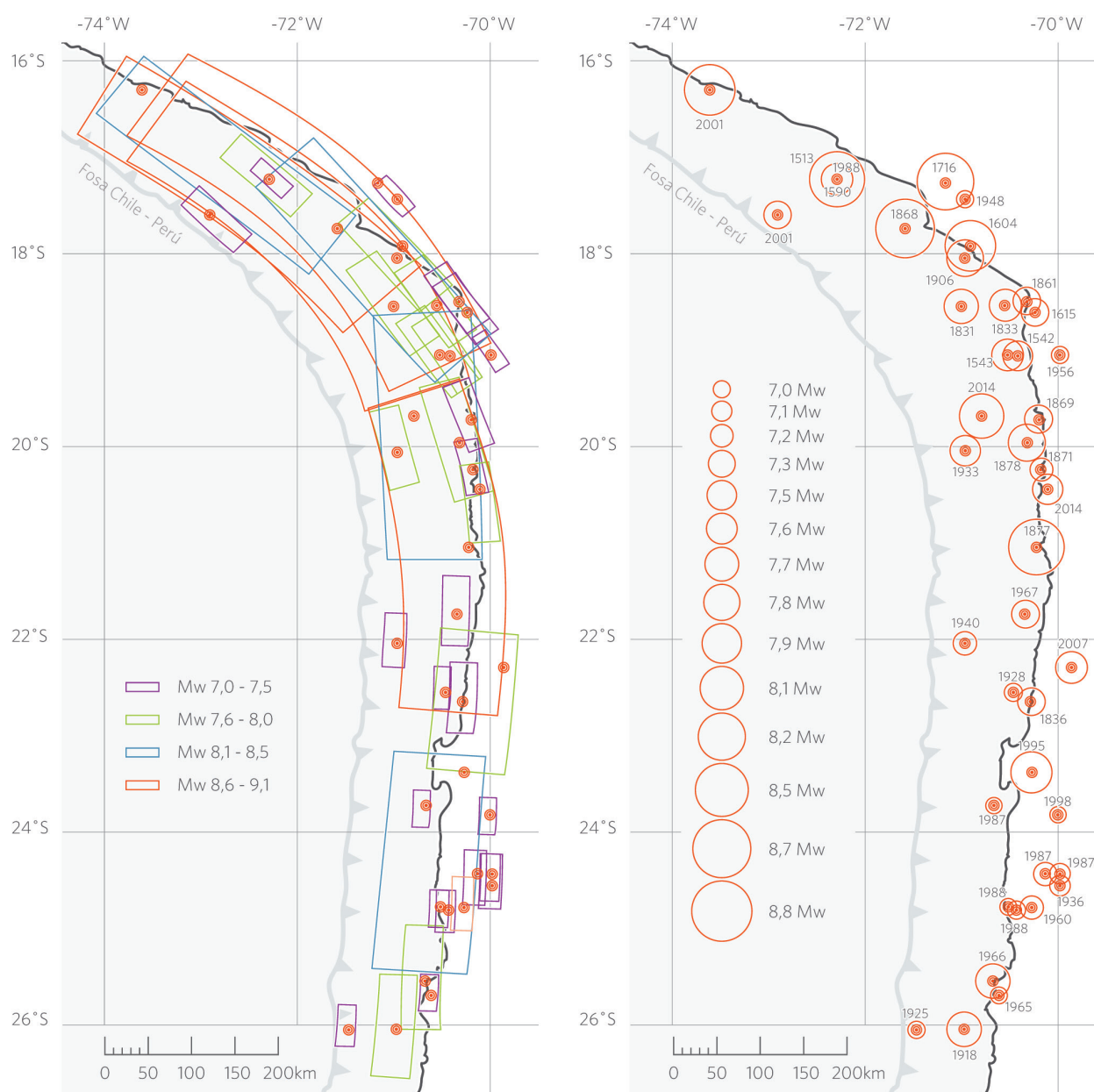
3.2 ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD HISTÓRICA Y LOCALIZACIÓN DE LAS ASPEREZAS

Los primeros registros sísmicos en la zona datan del tiempo de ocupación hispánica, siendo el primer sismo documentado el año 1543 en la ciudad de Arica, para el cual se estima una magnitud M_w de 7,8.

En la Figura 3.2 se resumen los sismos históricos con magnitud M_w mayor a 7,0 ocurridos en la región, mientras que los terremotos que generaron tsunamis se resumen en la Tabla 3.1 (página siguiente).

Figura 3.2:

Localización de terremotos históricos con magnitud mayor a M_w 7,0 ocurridos en el norte de Chile y Sur del Perú. Los rectángulos dibujados en el mapa de la izquierda, representan planos de ruptura cuyas áreas están escaladas a la magnitud de momento (Blaser *et al.* 2010).



(Elaboración propia basada en datos de sismicidad histórica de Comte & Pardo 1991; Pritchard *et al.* 2007; Loveless *et al.* 2008; Sladen *et al.* 2013; Wei *et al.* 2014).

Tabla 3.1

Grandes terremotos tsunamigénicos en el norte de Chile y Sur del Perú

LOCALIZACIÓN EPICENTRO	AÑO	M _w
Sur del Perú	1513	8,7
Sur del Perú	1716	8,8
Sur del Perú	1604	8,0
Sur del Perú	1868	8,8
Norte de Chile	1877	8,7
Norte de Chile	2014	8,2

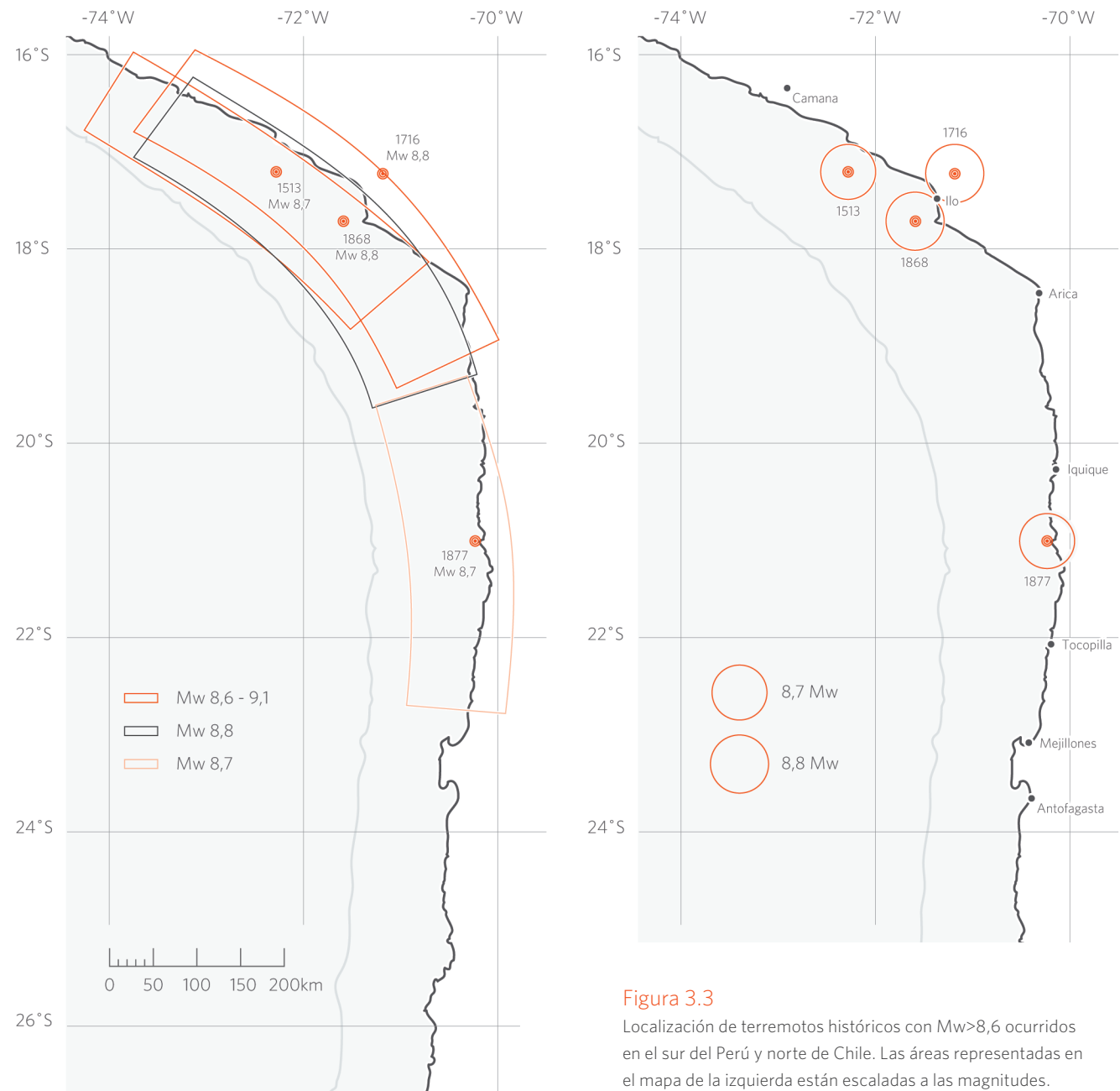


Figura 3.3

Localización de terremotos históricos con $M_w > 8,6$ ocurridos en el sur del Perú y norte de Chile. Las áreas representadas en el mapa de la izquierda están escaladas a las magnitudes.

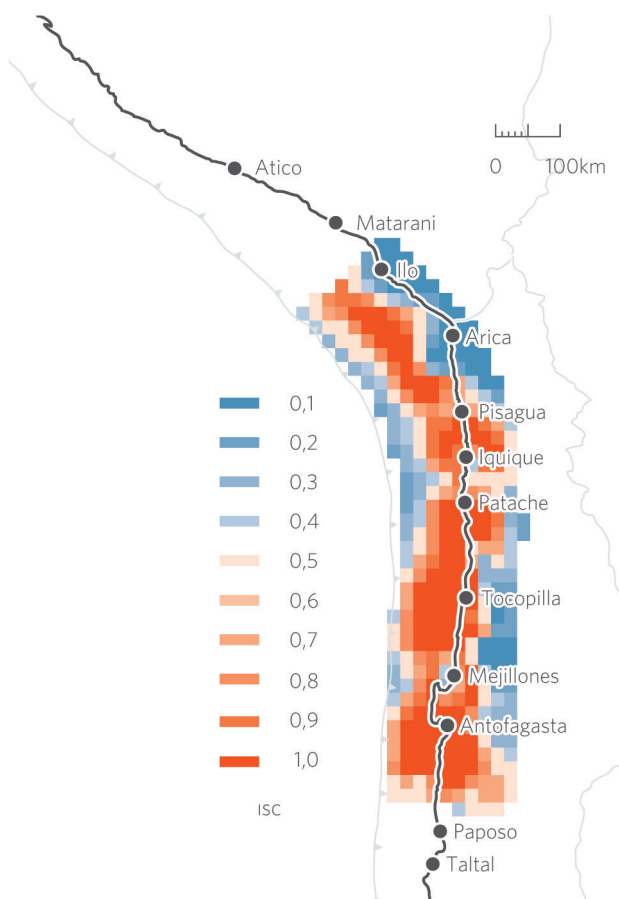
3.3 MODELOS DE ACOPLAMIENTO GEODÉSICOS

El advenimiento de la geodesia espacial en la década de los 90 permitió el estudio instrumental de los movimientos de las placas tectónicas. Utilizando estaciones de sistema de posicionamiento satelital geodésico (GPS) se obtuvieron los primeros modelos de acoplamiento de las placas para el norte de Chile. El modelo de Khazaradze y Klotz (2003) consideró que en esta zona la gran falla de subducción está completamente acoplada desde una profundidad de 10 km hasta los 35 km y que a profundidades entre 35 km y 60 km, las placas están parcialmente acopladas. Modelos más recientes han mostrado que el acoplamiento es altamente variable en la superficie de contacto de las placas. Esta variabilidad permite distinguir segmentos en la falla de subducción altamente acoplados y segmentos con acoplamiento reducido.

El modelo de acoplamiento de las placas tectónicas para el sur del Perú y el norte de Chile propuesto por Metois *et al.* (2016) se muestra en la Figura 3.4. Esta figura muestra el plano de falla de subducción con una distribución de acoplamiento intersísmico que fluctúa entre 0 y 1. Los colores naranjos intensos corresponden a los valores de acoplamiento máximo. La Figura 3.4 muestra que en el sur de Perú el acoplamiento costa afuera tiene valores máximos en las cercanías del límite con Chile, y existen cuatro grandes regiones con acoplamiento alto entre en el sur del Perú y el norte de Chile. En tanto, costa afuera del norte de Chile, el nivel de acoplamiento es relativamente homogéneo, con una reducción en la península de Mejillones.

Figura 3.4

Modelo de acoplamiento geodésico para el sur del Perú y norte de Chile basado en Metois *et al.* (2016).



3.4 ESCENARIO SÍSMICO SELECCIONADO

El escenario sísmico extremo considera un terremoto de M_w 8,9 ($2,25 \times 10^{29}$ Dina-cm), con un centroide ubicado al sur de la ciudad de Iquique ($70,68^\circ W$; $22,05^\circ S$) y una profundidad de foco de 21 km. La duración del terremoto se estimó en 200 segundos utilizando una velocidad de propagación de las ondas de 3 km/seg. La magnitud máxima de la réplica esperada se estima en M_w 8,3 y esta ocurriría dentro de los 10 primeros días después del evento principal. Se considera que los grandes terremotos recientes (Andaman 2004, Maule 2010, Tohoku-Oki 2011, Pisagua 2014 e Illapel 2015) han demostrado que sus planos de ruptura contienen parches donde el deslizamiento cosísmico está concentrado. Adicionalmente, se ha podido demostrar que estos parches concentran el déficit de deslizamiento en la fase intersísmica. Del análisis de las zonas de acoplamiento alto de las placas tectónicas estimadas mediante la sismicidad histórica, el modelo geodésico sugiere la existencia de cuatro zonas de acoplamiento alto que sustentan el valor de magnitud seleccionado. La magnitud de M_w 8,9 del escenario se estimó considerando la ruptura simultánea de tres grandes asperezas, estando la mayor localizada al sur de Patache. Para el cálculo de la magnitud se consideró un módulo de rigidez de 40 GPa y un área de ruptura de 108.000 km².

El peor escenario para la ciudad de Iquique está dado por un terremoto con un déficit de deslizamiento máximo de 9,2 m y un déficit de deslizamiento promedio de 5,2 m. Para este caso, el déficit de deslizamiento se estimó con el modelo de acoplamiento de Metois *et al.* (2016). El déficit considera que las placas están parcialmente acopladas y que el acoplamiento promedio es de 0,54.

3.5 ESTIMACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

Para estimar los daños físicos directos causados por escenarios determinísticos de terremotos, es necesario caracterizar la amenaza sísmica en términos de parámetros standard usados por ingenieros para describir el movimien-

to del suelo y estimar su impacto sobre estructuras. Estos parámetros corresponden a la aceleración máxima del suelo (PGA), velocidad máxima del suelo (PGV) y aceleraciones espectrales para períodos de 0,3 y 1,0 segundos (PSA03 y PSA10). La aceleración espectral PS03 (o PSA10) corresponden a la respuesta sísmica que tendría un oscilador de 0,3 (1,0) segundos de periodo debido al movimiento del suelo. Estos cuatro parámetros (PGA, PGV, PSA03 y PSA10) se obtienen de leyes de atenuación que predicen el nivel de movimiento del suelo en cada sitio con base a la magnitud del terremoto, el mecanismo de falla, la distancia entre el sitio y la fuente y las condiciones locales de suelo.

El cálculo de la aceleración máxima del suelo (PGA) y las aceleraciones espectrales (PSA03 y PSA10) para el escenario extremo de magnitud M_w 8,9 se obtuvo utilizando las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPes) propuestas por Abrahamson *et al.* (2016) para zonas de subducción. Estas ecuaciones las obtuvieron a partir de una base de datos global de registros empíricos de movimiento fuerte para 292 eventos y fueron probadas satisfactoriamente para el caso del terremoto del Maule, ocurrido el 27 de Febrero de 2010, de magnitud M_w 8,8. Para estimar la velocidad máxima del suelo (PGV), se utilizaron las ecuaciones de predicción del movimiento de Kanno *et al.* (2006), derivadas partir de registros de movimiento fuerte para terremotos de subducción ocurridos en Japón entre 1963 y 2003. En ambos casos, se utilizan las ecuaciones para estimar aceleraciones y velocidades esperadas en un sitio ubicado sobre roca. Posteriormente, en cada sitio se aplicaron correcciones para incluir el efecto de amplificación debido a condiciones locales del suelo siguiendo las directrices de National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP, 1997). En esta guía, se define un esquema de clasificación geológica de sitios basado en la velocidad de corte de la onda sísmica en los últimos 30 metros (V_{s30}), y se entregan valores de amplificación recomendados para cada clase de sitio. Los valores de V_{s30} utilizados para Iquique provienen de la microzonificación sísmica elaborada por Becerra *et al.* (2015), que sugiere una geología más

bien heterogénea para la ciudad. Como se muestra en la Figura 3.5, el área urbana de Iquique se divide de acuerdo al comportamiento dinámico del suelo en nueve zonas, con predominancia de sitios de roca en el centro de la ciudad, y condiciones de tierra densa hacia los límites norte y sur-este de la ciudad y en la zona del puerto, donde se espera por

lo tanto mayor amplificación del movimiento. En la Tabla 3.2 se detallan las características de los suelos en las nueve zonas. Para cada zona se detalla la velocidad de ondas de corte, la clasificación del sitio según NEHRP, los factores de amplificación asignados, y las estimaciones de PGA, PSA03, PSA10 y PGV para el escenario extremo propuesto.

Figura 3.5

Microzonificación sísmica de Iquique (izquierda) y aceleración máxima del suelo (PGA) estimada para el escenario extremo de Mw 8,9.

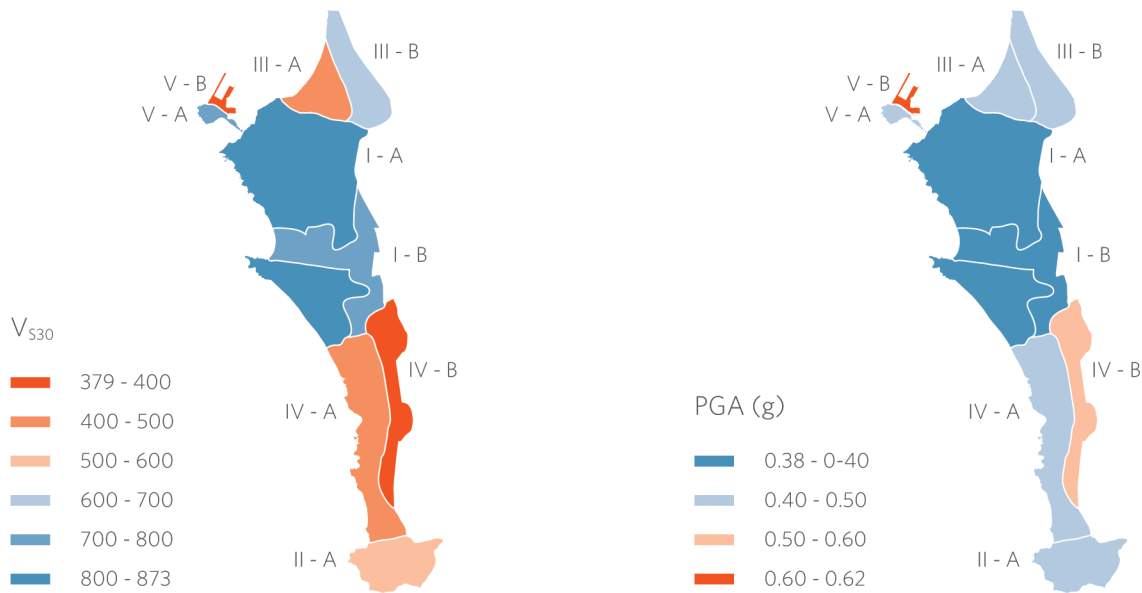


Tabla 3.2

Microzonificación sísmica para Iquique (Becerra *et al.* 2015), factores de amplificación del movimiento del suelo y estimaciones de parámetros de movimiento del suelo para el escenario extremo de Mw 8,9

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA PARA IQUIQUE									
	I-A	I-B	II-A	III-A	III-B	IV-A	IV-B	V-A	V-B
V _{s30} (m/s)	872 ± 183	768 ± 166	577 ± 86	461 ± 50	612 ± 35	403 ± 38	379 ± 48	762 ± 205	393 ± 78
Clase de sitio NEHRP	B	B	C	C	C	C	D	C	D
Amplificación PGA/PSA03	1	1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.6	1.2	1.6
Amplificación PSA10/PGV	1	1	1.6	1.6	1.6	1.6	2.0	1.6	2.0
PGA (g)	0.38	0.38	0.45	0.45	0.45	0.45	0.60	0.46	0.62
PSA03 (g)	0.67	0.66	0.78	0.80	0.79	0.79	1.05	0.81	1.08
PSA10 (g)	0.27	0.27	0.42	0.43	0.43	0.42	0.53	0.43	0.54
PGV (cm/s)	71.84	71.09	111.43	114.67	113.79	112.43	140.57	118.04	147.20

4 ESCENARIO DE TSUNAMI

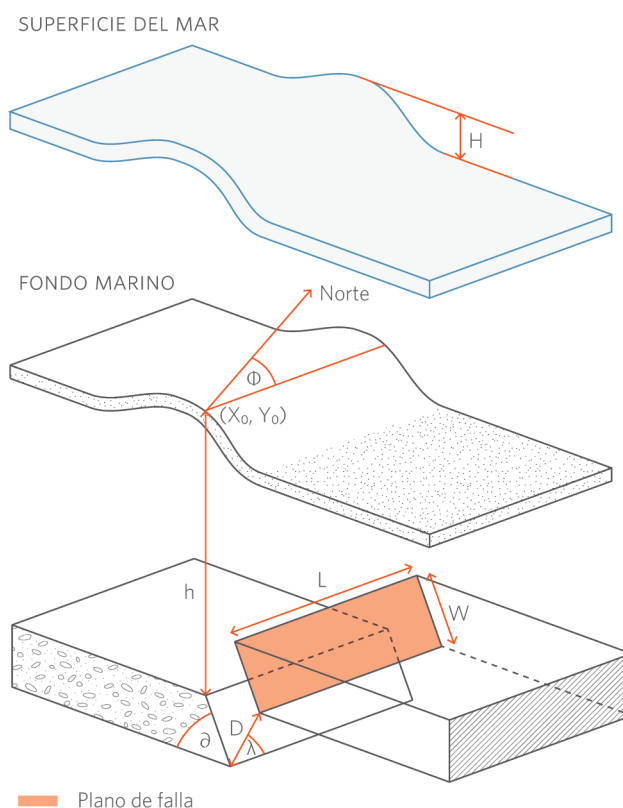
En este capítulo se describe la máxima inundación por tsunami generada por el terremoto extremo de magnitud M_w 8,9 definido en el capítulo 3. La máxima altura de ola estimada para este potencial sismo puede superar los 5,5 m y ocurriría 110 min después del terremoto. Esta estimación se obtuvo a partir de la simulación numérica siguiendo las recomendaciones definidas en el documento “Guía para la estimación de peligro de tsunami” elaborado en el marco del proyecto JICA/Satreps (JICA 2016). En la simulación se utilizan cuatro mallas anidadas de diferente resolución espacial que se construyeron a partir de diferentes fuentes topobatimétricas. Adicionalmente, en este capítulo se estiman las profundidades de inundación en la zona costera, los tiempos de arribo de las olas y las velocidades máximas del flujo de agua.

4.1 CONDICIÓN INICIAL DEL TSUNAMI

La condición inicial del tsunami o deformación inicial de la superficie del mar que genera las ondas del tsunami se calcula a partir del modelo de desplazamiento interplaca dado en la sección 3.5. Para ello se utiliza la formulación de Okada (1985), la cual entrega una solución analítica para la deformación del lecho marino a partir de la longitud (L), ancho (W), profundidad característica (h), rumbo (ϕ), manteo (∂), ángulo de desplazamiento (λ) y desplazamiento interplaca (D) de cada subfalla. La Figura 4.1 muestra el plano de falla en el contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana y la definición de los parámetros requeridos en la formulación de Okada. La deformación inicial de la superficie de mar se asume igual a la deformación del fondo marino (Figura 4.1).

Figura 4.1

Parámetros usados en la formulación de Okada para la generación de la condición inicial del tsunami.

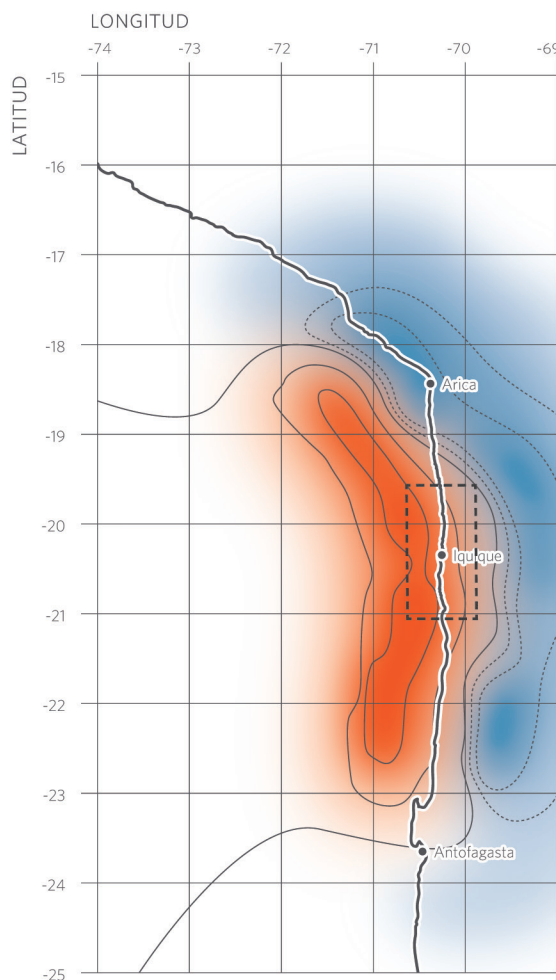


La Figura 4.2a) muestra la deformación de la corteza terrestre obtenida por superposición de las 300 subfallas del modelo de desplazamiento interplaca. La Figura 4.2b) muestra un acercamiento a la zona de Iquique, donde se observa que Iquique experimentaría un alzamiento de 1,2 m. Siguiendo las recomendaciones de la "Guía para la estimación de Peligro de Tsunami" (JICA 2016) se modificaron las mallas de simulación de manera de no incluir el levantamiento del terreno, pues esto representa un escenario desfavorable desde el punto de vista de la inundación.

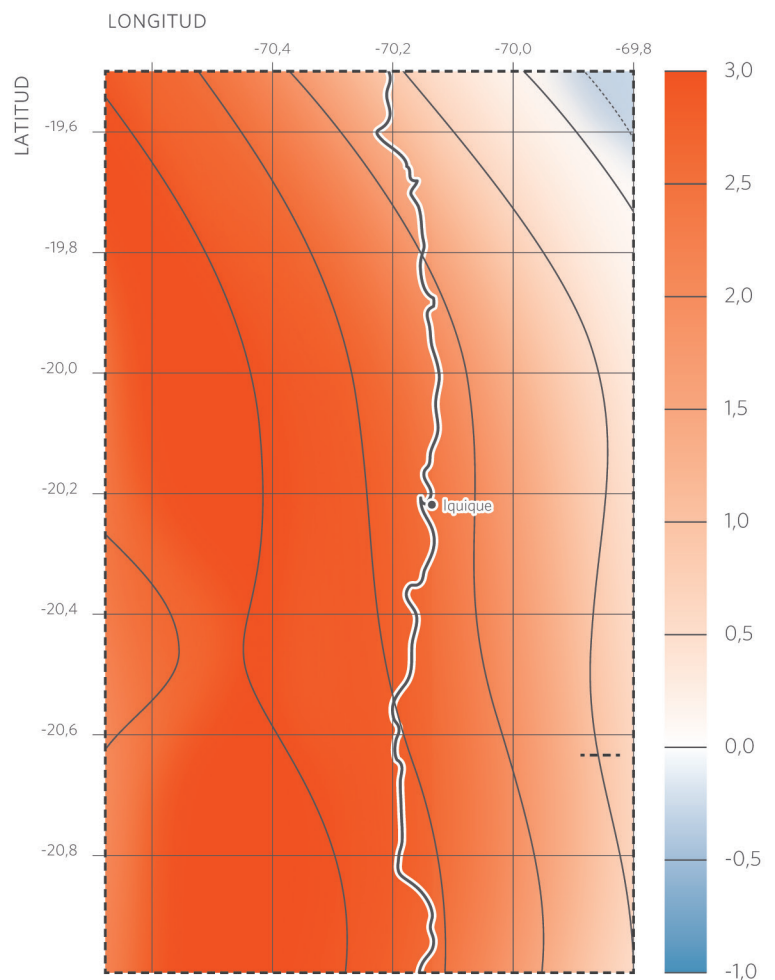
Figura 4.2

Deformaciones cosísmicas. En color rojo se representan los alzamientos y en azul las subsidencias.

a) Vista general de las deformaciones cosísmicas en la zona norte de Chile. Las líneas continuas representan isolíneas cada 1 m, mientras que las líneas segmentadas corresponden a isolíneas cada 50 cm.



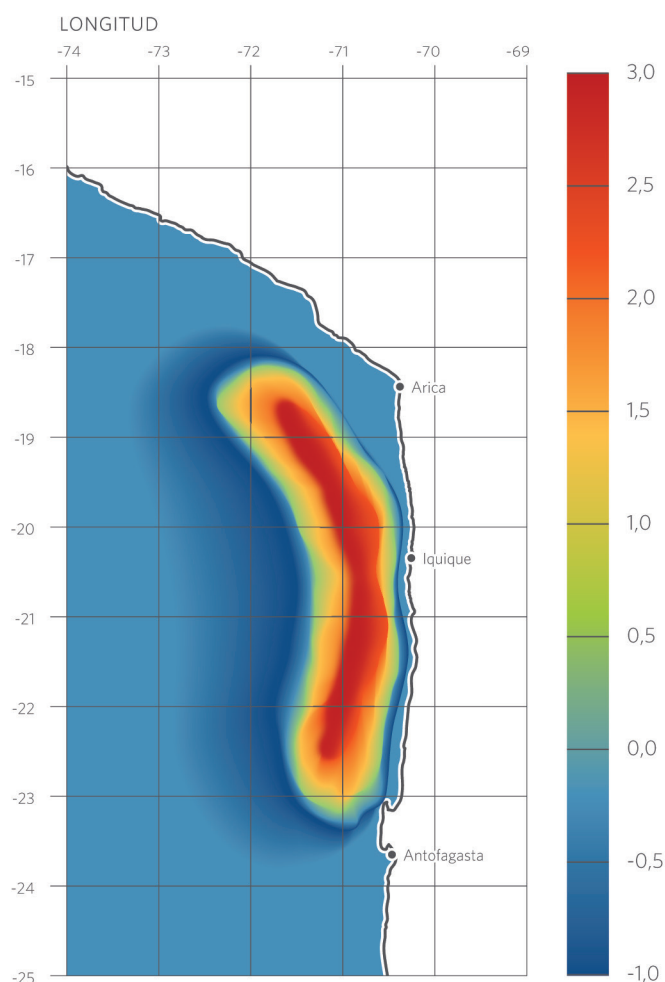
b) Acercamiento a la zona de estudio. En este caso las líneas continuas corresponden a isolíneas cada 50 cm.



La Figura 4.3 muestra la deformación de la superficie del mar, que corresponde a la condición inicial del tsunami. Se puede observar que la máxima deformación vertical es de 3 m al sur de Iquique, lo que es coherente con las deformaciones co-sísmicas mostradas en la Figura 4.2.

Figura 4.3

Deformación inicial de la superficie del mar para inicializar la simulación de tsunami.



4.2 SIMULACIÓN NUMÉRICA

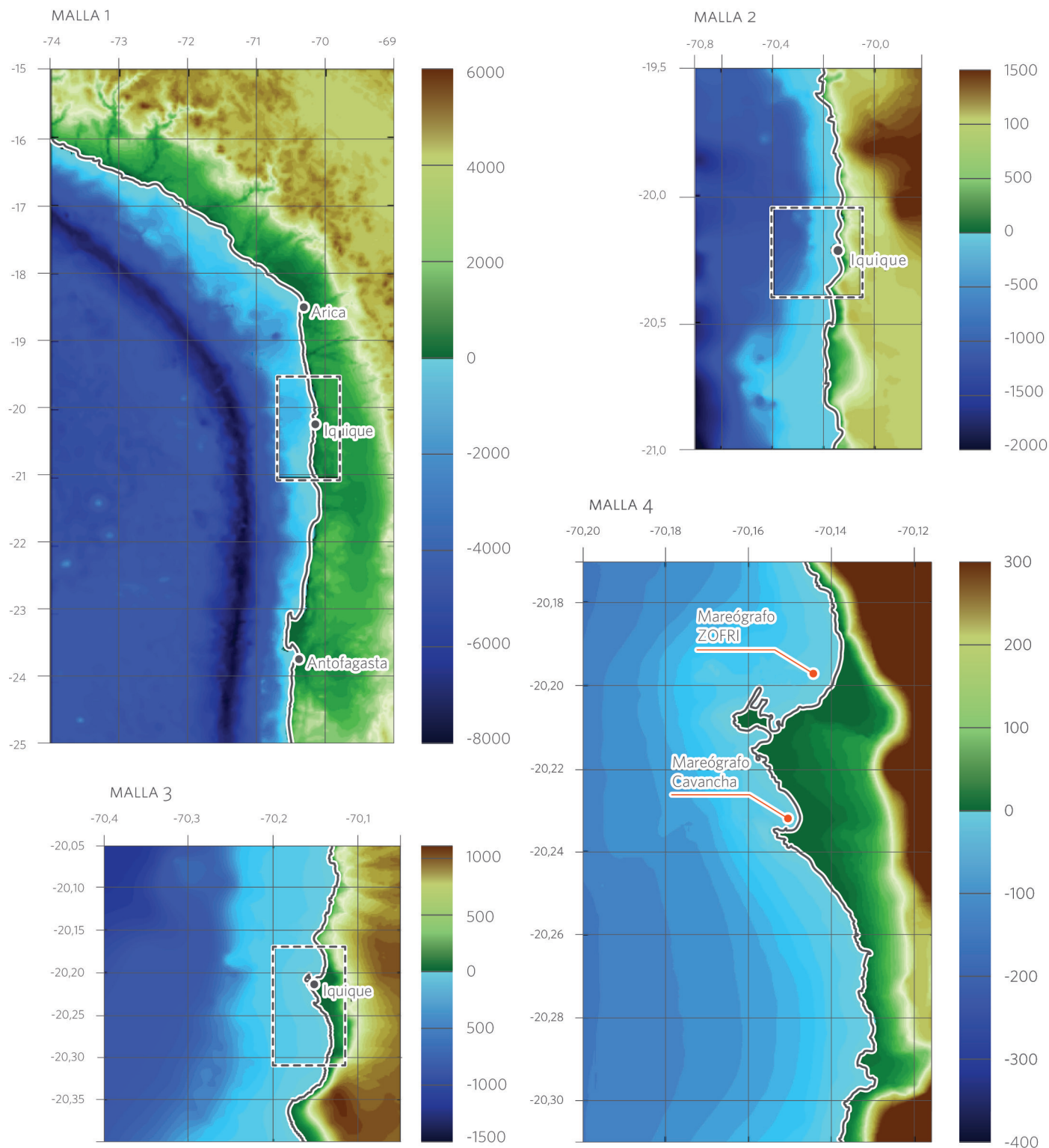
Se utilizó el modelo Non-hydrostatic Evolution of Ocean Waves (NEOWAVE) (Yamazaki *et al.* 2009; Yamazaki *et al.* 2011). Este modelo resuelve las ecuaciones lineales y no lineales del movimiento de aguas someras considerando la componente de presión no hidrostática. Para las simulaciones se consideró un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,025, recomendado para zonas acuáticas y espacios vacíos (JICA 2016). El tiempo total de simulación fue de 4 horas y se obtuvieron las elevaciones de la superficie del mar y las velocidades promediadas en la vertical en cada minuto.

En el modelo numérico se utilizaron 4 mallas anidadas (Figura 4.4) de diferente resolución espacial. La malla 1 es de 120" (~3,7 km) de resolución y se utilizó para la generación del tsunami y propagación hacia el Océano Pacífico. Esta malla se construyó a partir de datos topobatemétricos obtenidos de General Bathymetric Charts of the Oceans (GEBCO 2015). La malla 2 es de 30" (~890 m) de resolución y se construyó también a partir de datos GEBCO más cartas náuticas. Las mallas 3 y 4, de 6" y 1" respectivamente, se construyeron mediante cartas náuticas y batimetrías de detalle aportadas por la Dirección de Obras Portuarias en los sectores de Caleta Riquelme, Playa Cavanca y Playa Brava. Adicionalmente, a las mallas 3 y 4 se les incorporó topografía de detalle satelital LiDAR. Esta topografía considera sólo la elevación del terreno y no las edificaciones, puesto que la máxima resolución utilizada (~30 m) no es suficiente para incluirlas.

Figura 4.4

Mallas utilizadas en la simulación numérica. La malla 1 es de 120" (~2.7 km) de resolución, malla 2 de 30" (~900 m) de resolución, malla 3 de 6" (~180 m) de resolución y malla 4 de 1" (~30 m) de

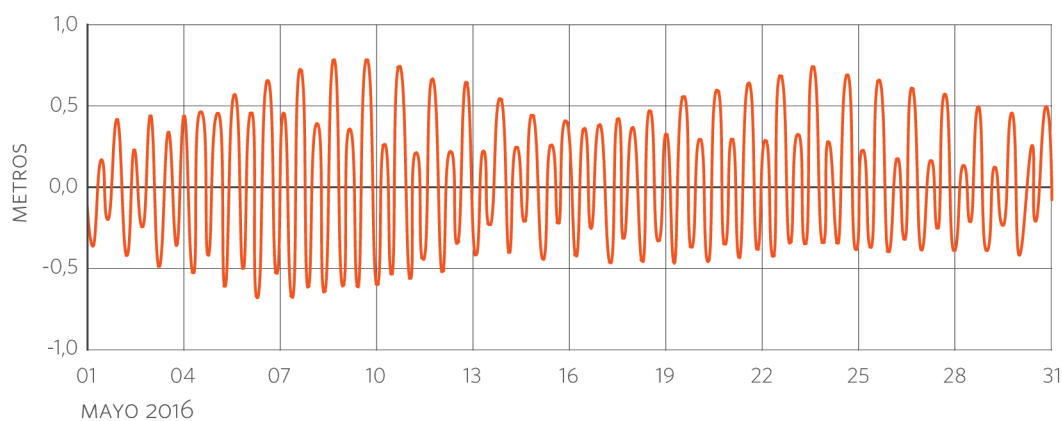
resolución. Los asteriscos frente a ZOFRI y Cavancha indicados en malla 4 corresponden a puntos donde se obtuvieron mareogramas virtuales.



La variación de la marea en la zona de estudio puede alcanzar 1,5 m y una marea alta en sicigia (mayores rangos de marea) de 0,8 m sobre el nivel medio del mar. La Figura 4.5 muestra el comportamiento de la marea durante un mes (mayo de 2016), donde se puede observar claramente los periodos de sicigias y cuadraturas (mayores y menores rangos de marea respectivamente). Una condición desfavorable para el escenario de tsunami es que la máxima inundación coincida con una marea alta en sicigia de 0,8 m (Figura 4.5). Este efecto se puede incorporar manualmente en las mallas de simulación. Posteriormente, los resultados de altura de inundación y series de tiempo son corregidos por el nivel de marea agregado a la topobatimetría.

Figura 4.5

Variación de la marea en Iquique para el mes de mayo de 2016 (UNESCO 2016).



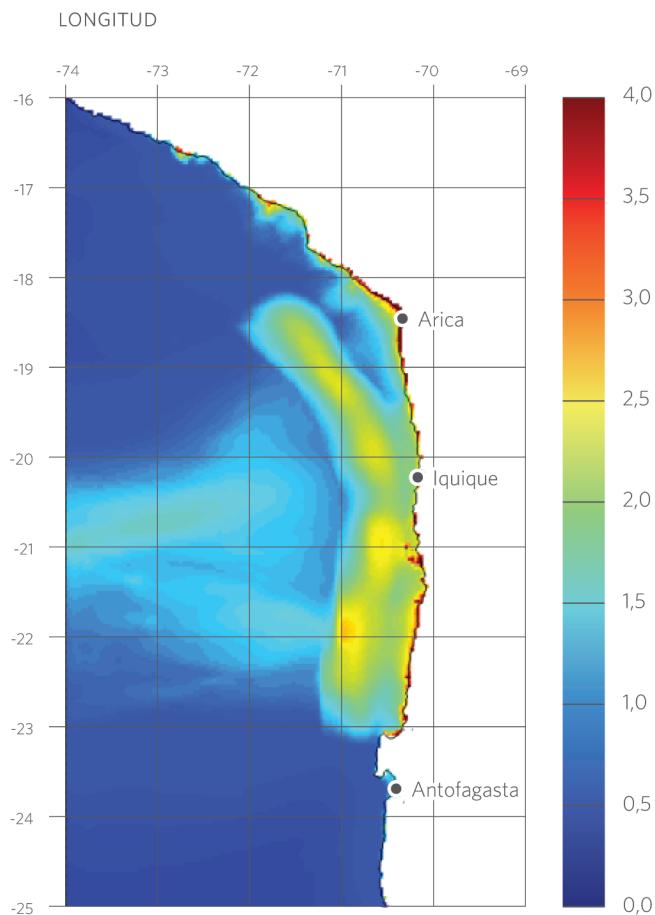
4.3 MAPAS DE INUNDACIÓN

Los resultados de la simulación numérica del tsunami se presentan en esta sección. Las variables de interés son las alturas de inundación, el área máxima de inundación, los tiempos de arribo de las ondas y las velocidades máximas.

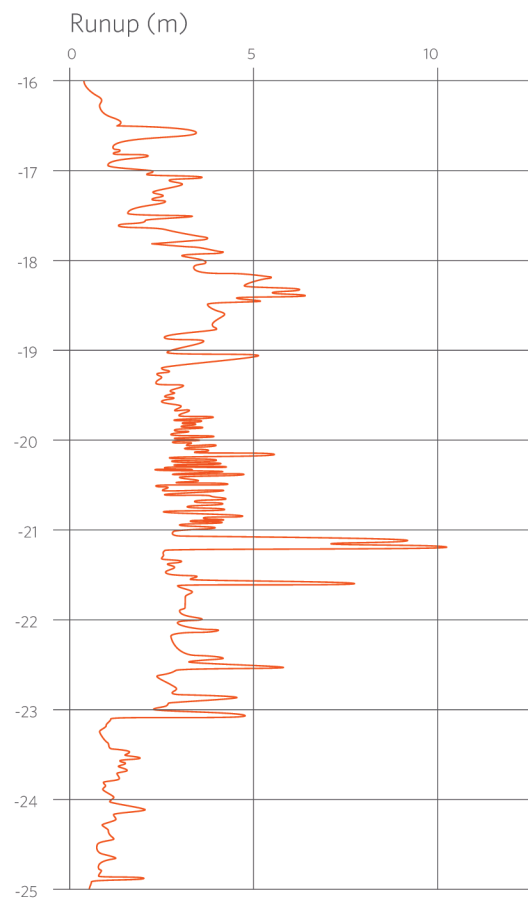
En primer lugar, la Figura 4.6 muestra las máximas amplitudes de la superficie del mar generadas por el tsunami en la zona norte de Chile. La Figura 4.6a) muestra un mapa de las amplitudes máximas desde la zona de generación del tsunami hasta la costa de Chile, mientras que la Figura 4.6b) muestra las máximas cotas de inundación (runup) a lo largo de la costa. En general, se observa que las máximas inundaciones tienen un comportamiento variable a lo largo de la costa, con zonas que superan los 5 m, como Arica e Iquique, y con algunos valores puntuales que superan incluso los 10 m al sur de Iquique.

Figura 4.6

a) Amplitudes máximas del tsunami (metros).



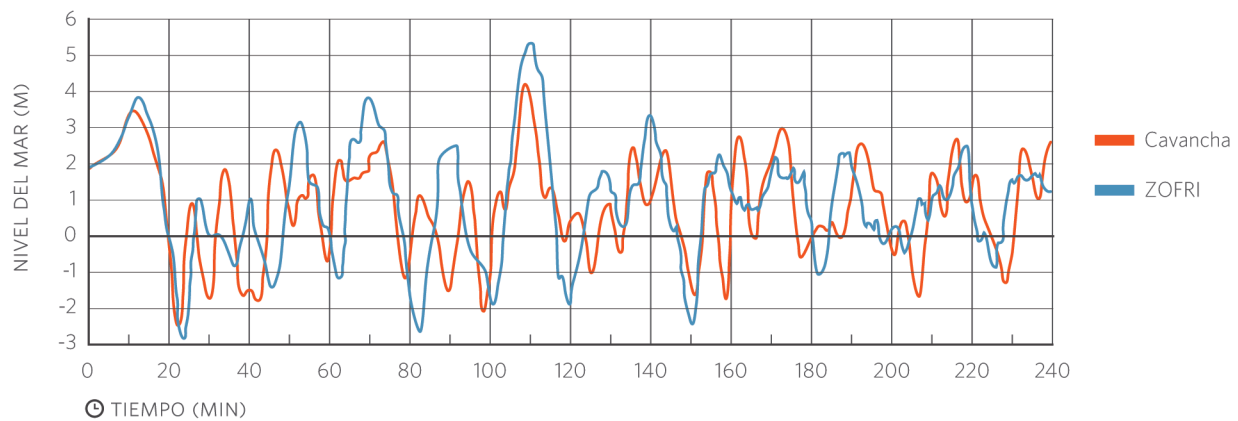
b) Distribución de máximas cotas de inundación (runup) a lo largo de la costa.



La Figura 4.7 muestra la variación del nivel del mar en los puntos Cavancha y ZOFRI, ubicados frente a Iquique (Figura 4.4). Se observa que la primera onda alcanza 4 m de altura y que la ola de mayor amplitud alcanza los 5,5 m y ocurre 110 min después de ocurrido el evento.

Figura 4.7

Mareogramas en Cavancha y ZOFRI.

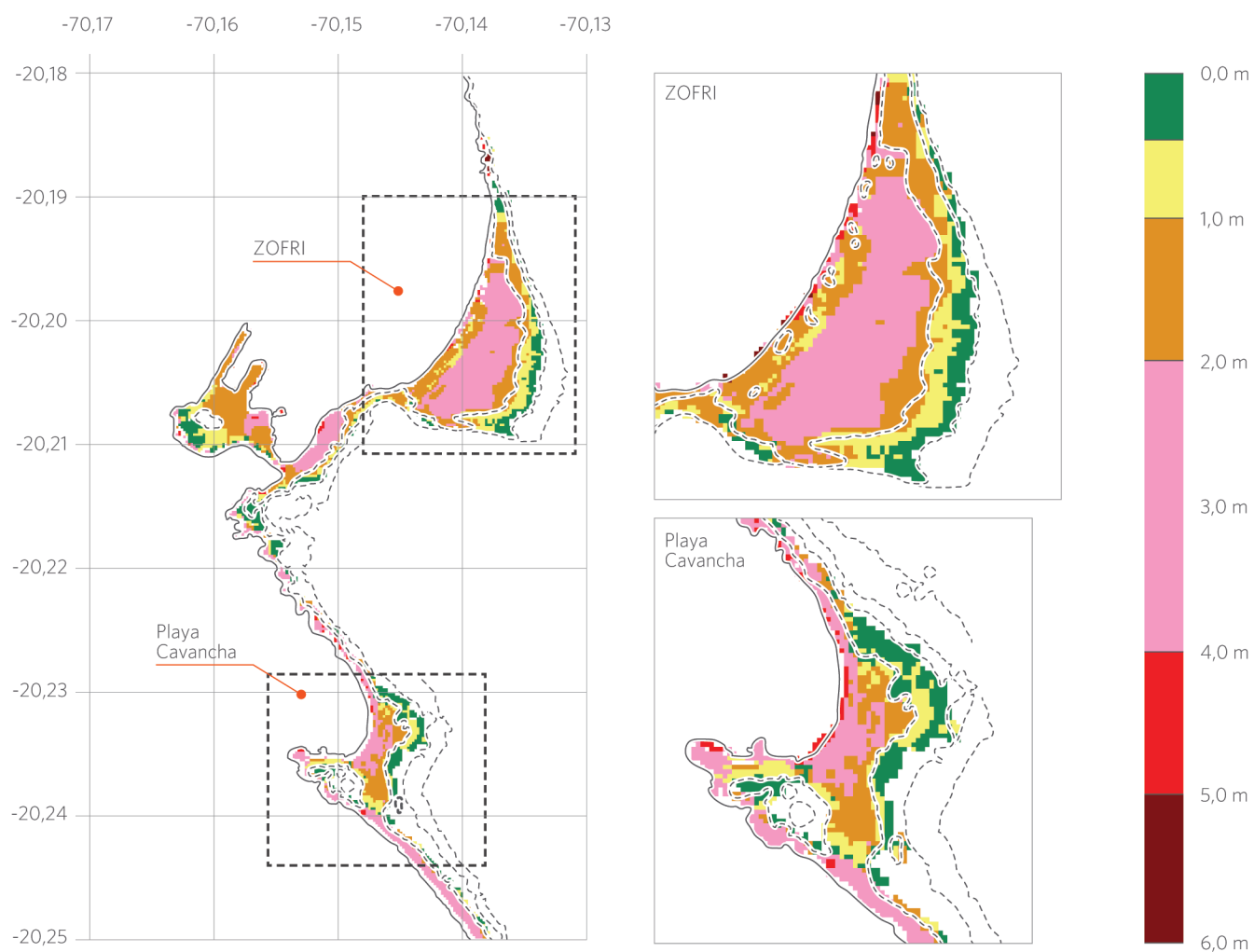


La Figura 4.8 muestra el área de inundación así como las máximas profundidades de flujo estimadas en la zona de estudio. Los recuadros de la derecha muestran un acercamiento en la zona de la ZOFRI y Cavancha. Se puede observar que en la zona de la ZOFRI, las máximas profundidades de inundación alcanzan hasta 4 m en sectores alejados de la línea de costa. Esto se debe a que las cotas del terreno disminuyen al alejarse de la costa y luego aumentan nuevamente. Esta característica generaría también una acumulación de agua en caso de inundación, impidiendo

la evacuación del agua hacia el mar. Por su parte, la zona de Cavancha experimentaría una inundación que ingresa por ambos lados de la península, la cual se convertiría temporalmente en una isla. Esta situación generaría que las vías de evacuación hacia sectores elevados de la ciudad podrían verse interrumpidas. Por lo tanto, las medidas de mitigación o planes de evacuación debiesen considerar la factibilidad de realizar evacuación vertical dentro de la península de Cavancha.

Figura 4.8

Área de inundación y máximas profundidades de flujo. Los recuadros en el lado derecho corresponden a un acercamiento en la zona de la ZOFRI y Cavancha.



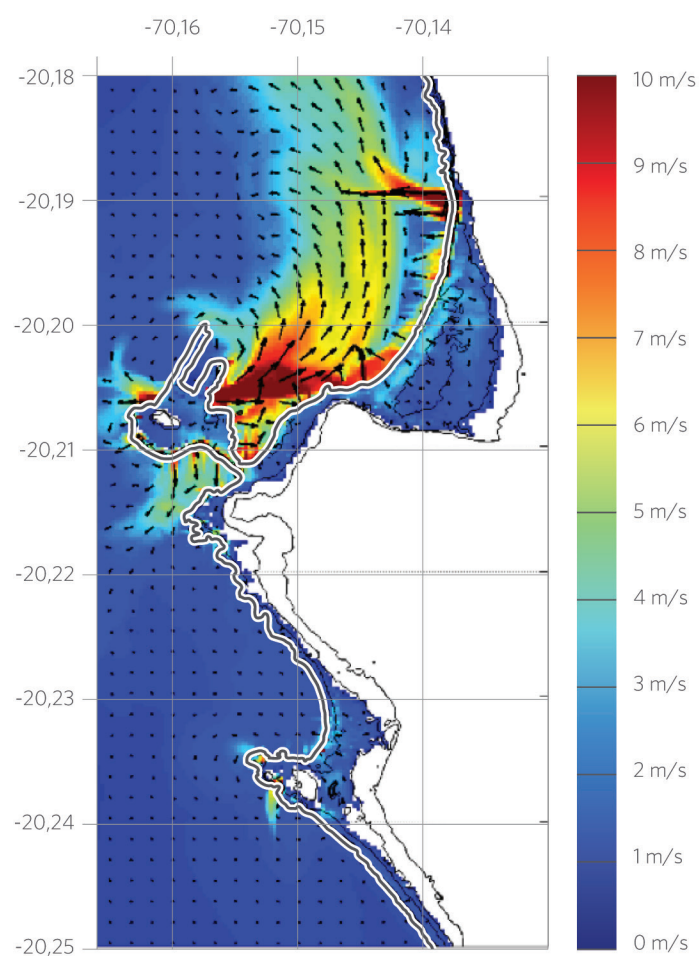
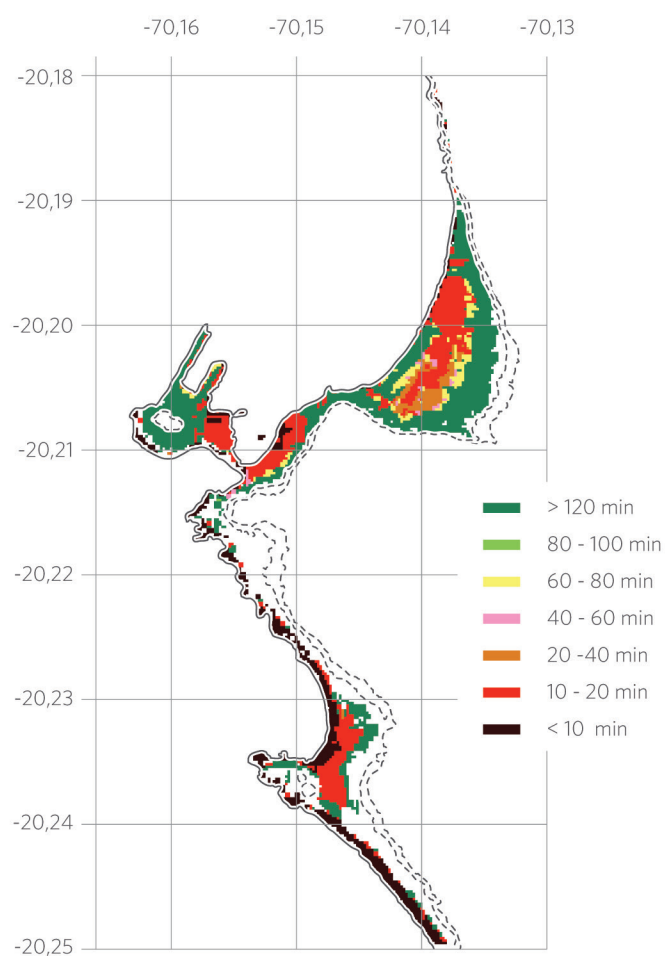
Finalmente, la Figura 4.9 muestra resultados de tiempos de arribo de las ondas y velocidades máximas de corriente. Se observa que la zona de playa en Cavancha se inundaría antes de 10 minutos después del sismo, y antes de 20 minutos el agua inundaría todo el sector dejando la península completamente aislada. Esta inundación se genera por la llegada de la primera gran onda aproximadamente 12 minutos después de ocurrido el sismo (Figura 4.7). Por su parte, los sectores bajos de la zona de la ZOFRI serían inundados por la primera onda antes de 20 minutos y la máxima inundación se alcanzaría para la ola de mayor amplitud a los 110 minutos.

La Figura 4.9 a) presenta una estimación de las velocidades máximas del flujo. Esta variable es relevante para estimar, en conjunto con la profundidad de inundación, el poder destructivo del tsunami. También es importante para anticipar el potencial arrastre de embarcaciones o elementos pesados por las corrientes. Se observa que en algunos sectores, las velocidades del flujo pueden alcanzar valores tan altos como 10 m/s. Esta intensidad de corrientes es muy alta y podría provocar importantes movimientos de embarcaciones, containers y arena de la playa. En la zona de inundación, las velocidades podrían alcanzar valores de hasta 4 m/s, lo que representa un alto potencial de arrastre.

Figura 4.9.

a) Mapa de tiempos de arribo de las ondas del tsunami.

b) Mapa de velocidades de corriente.



5 IMPACTO DIRECTO AL ENTORNO FÍSICO Y SOCIAL

En este capítulo se estima el impacto directo al entorno físico y social que generaría el movimiento del suelo del terremoto extremo de magnitud Mw 8,9. El daño esperado en las edificaciones de Iquique se estima utilizando la plataforma HAZUS. Como resultado se obtiene el número de edificaciones residenciales, comerciales, educacionales e industriales que tendrían daño en distintos niveles.

5.1 IMPACTO DEBIDO AL MOVIMIENTO DEL SUELO

Para la estimación del daño en las edificaciones de Iquique debido al movimiento sísmico se consideró el entorno físico descrito en el capítulo 2 y la estimación del movimiento del suelo del capítulo 3. En particular se utilizaron 14 tipologías constructivas (Figura 2.1) y las estimaciones de la aceleración y velocidad máxima del suelo (PGA y PGV, Tabla 3.2). Adicionalmente, se consideró el potencial de licuefacción y de ocurrencia de derrumbes (Figura 5.1).

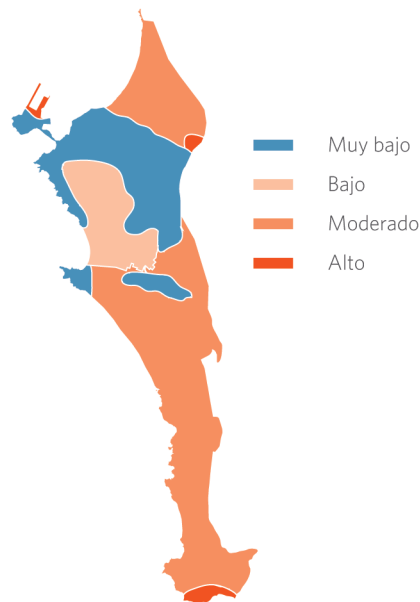
La información descrita se utilizó como insumo para la estimación de pérdidas en HAZUS (FEMA 2015), que es una plataforma computacional que contiene modelos para estimar las pérdidas potenciales de terremotos, inundaciones y huracanes. HAZUS utiliza la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (GIS) para estimar los impactos

físicos, económicos y sociales generados por desastres. Adicionalmente, ilustra de manera gráfica los lugares de alto riesgo debido a terremotos, huracanes e inundaciones.

Para estimar los daños físicos directos, HAZUS combina la demanda sísmica del suelo, caracterizada en términos de PGA, PGV y aceleraciones espectrales, con la respuesta sísmica de las edificaciones. Para estimar como responde una edificación frente al movimiento del suelo, HAZUS utiliza curvas de capacidad y fragilidad sísmica. Las curvas de capacidad sísmica relacionan la fuerza necesaria para deformar una edificación con el desplazamiento lateral del techo. Las curvas de fragilidad sísmica relacionan la intensidad del movimiento del suelo (PGA, PGV o aceleración espectral) con el nivel de daño esperado en las edificaciones.

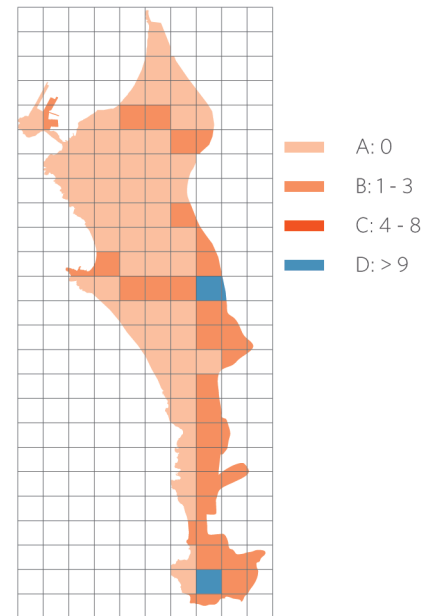
Figura 5.1.

(a) Potencial de licuefacción.



Previo a la aplicación de HAZUS para la estimación de los daños en el escenario considerado en este estudio, la metodología fue aplicada para estimar el daño físico general para el terremoto de Pisagua 2014. La comparación de los daños estimados utilizando HAZUS con los daños reportados por la Municipalidad de Iquique y el MINVU, muestran que HAZUS estima razonablemente bien el escenario real (Aguirre et al. 2014). En efecto, la Tabla 5.1 muestra una buena correlación para edificaciones con daño completo y parcial. Las diferencias identificadas para edificaciones con daños menores (sin consecuencias estructurales) pueden atribuirse a que estos daños suele ser arreglados por los dueños de las edificaciones y suelen ignorarse en los catastros oficiales.

(b) Potencial de derrumbes.



Luego de validar la metodología para la ciudad de Iquique, utilizando HAZUS se pudo estimar los daños del escenario sísmico de magnitud Mw 8,9 descrito en el capítulo 3. Los resultados se presentan en términos de la cantidad de edificios en las clases de ocupación más relevantes que se espera que sufran diferentes niveles de daño (Figura 5.2)

Tabla 5.1

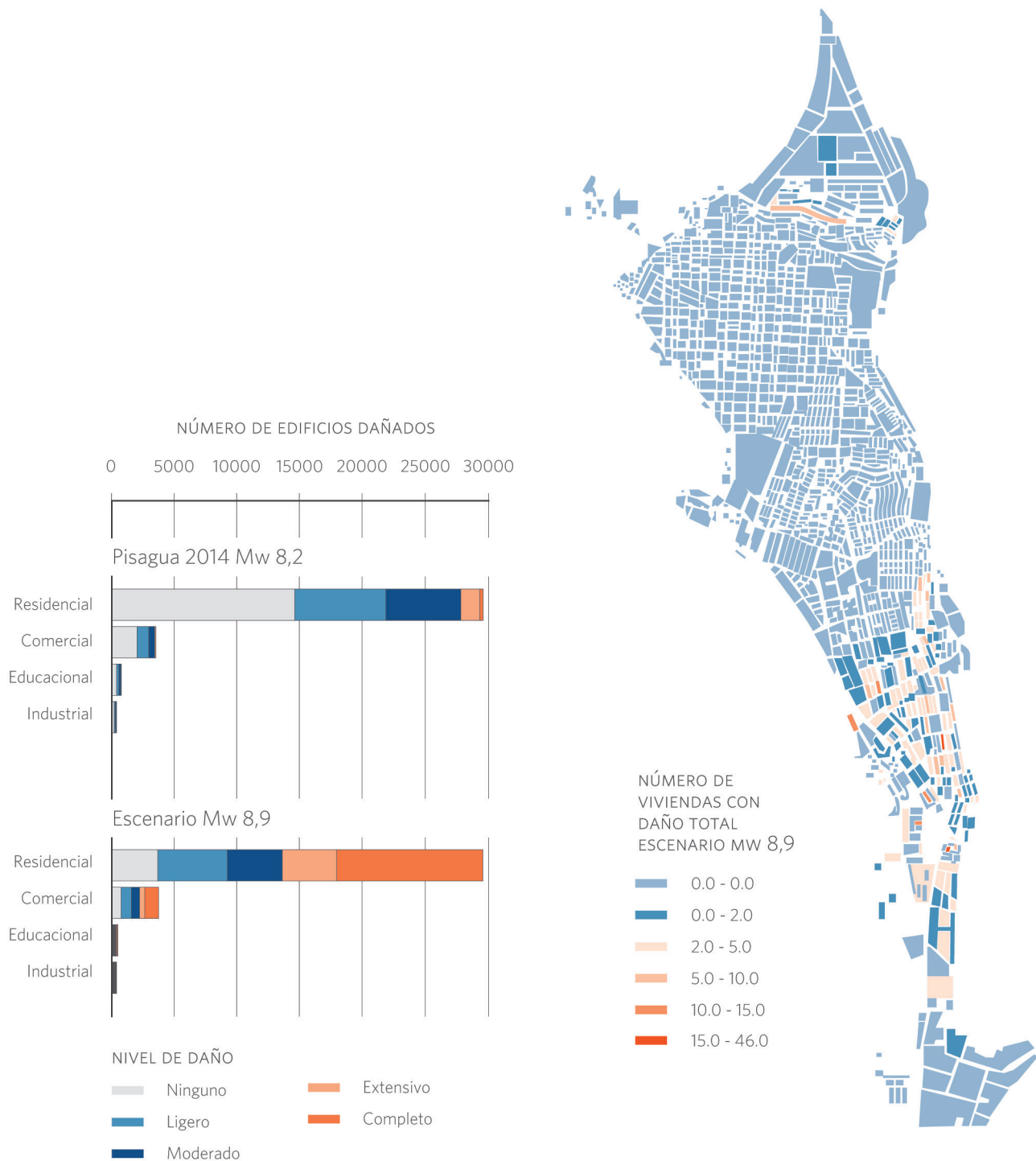
Daños reportados y estimados para edificios residenciales en Iquique después del terremoto de Pisagua 2014. Tomado de Aguirre *et al.* 2014.

FUENTE	TOTAL UNIDADES ANALIZADAS	DAÑO COMPLETO	DAÑO PARCIAL	DAÑO MENOR
Municipalidad de Iquique	2712	80	1806	826
MINVU	4766	908*	1656	2202
HAZUS	33386	95	1660	13285

* Incluye todos los departamentos dañados en edificios

Figura 5.2

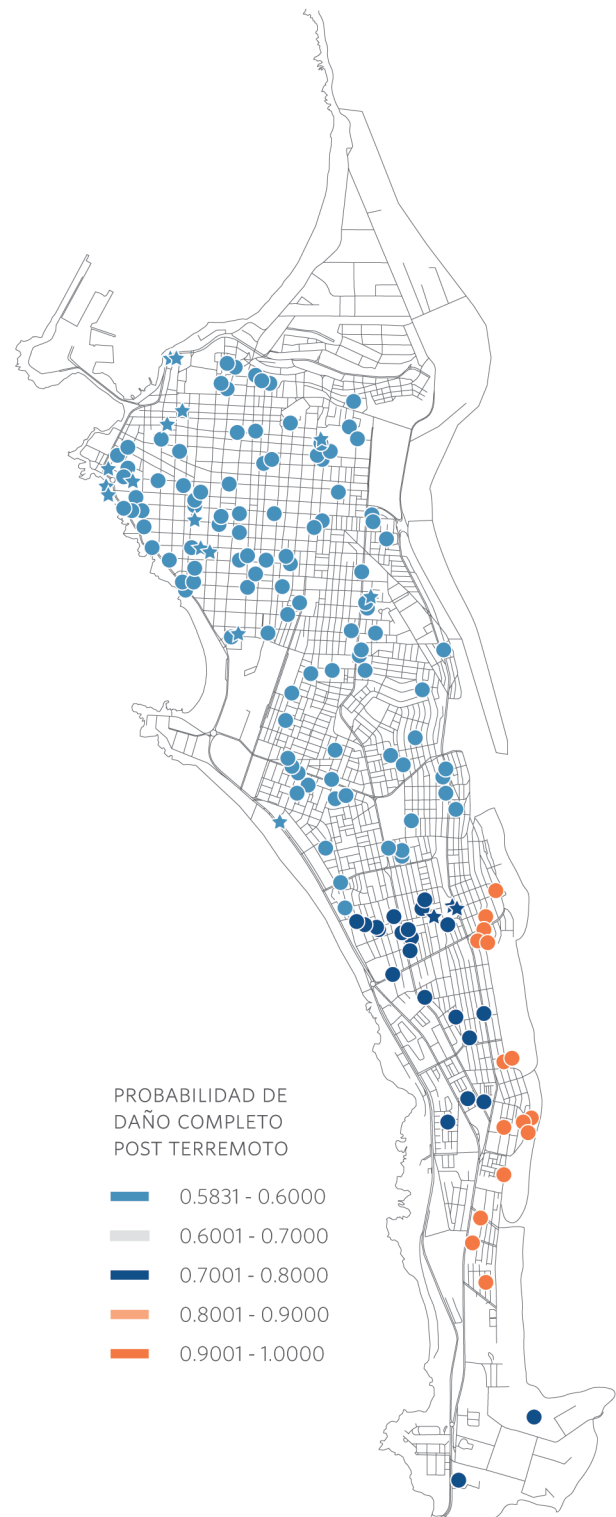
Resultados de la simulación de HAZUS para la ciudad de Iquique. (a)
Número de edificios dañados



La Figura 5.2 muestra que el impacto del escenario sísmico de Mw 8,9 sería significativo para Iquique. Aproximadamente el 40% de las viviendas residenciales experimentaría una pérdida total. El 27%, 20% y 28% de los establecimientos comerciales, educativos e industriales se verían seriamente dañados y eventualmente colapsados. Adicionalmente, la Figura 5.3) muestra que los centros de educacionales y de salud también serían gravemente afectados. El modelo predice que más del 58% de estos edificios sufriría pérdida total debido al terremoto. Este daño implicaría una pérdida de la funcionalidad de una gran parte de los servicios sociales críticos. Adicionalmente, el modelo predice que el 10% de las escuelas de Iquique tendría un daño mayor al 90%, lo que dejaría a aproximadamente 6500 estudiantes sin acceso a la educación y otros servicios prestados por las escuelas públicas como alimentación y refugio en caso de emergencia.

Figura 5.3

Daño a las edificaciones esenciales. Los círculos y estrellas representan la ubicación de escuelas y centros de salud. Los colores representan el nivel de daño esperado para el escenario de Mw 8,9.



6 EVACUACIÓN

Para simular la evacuación de la ciudad de Iquique se consideraron tres escalas diferentes. La primera escala considera una evacuación a nivel macro de la ciudad. La segunda escala considera una evacuación del centro de la ciudad y la tercera escala una evacuación de un colegio. En estas simulaciones las personas se modelaron como agentes, en el que la respuesta individual de cada persona es diferente.

Los resultados del modelo de agentes a escala macro muestran que en un escenario favorable, en el que la población inicie el proceso de evacuación de manera inmediata después del terremoto, la tasa de evacuación sería cercana al 90% de la población durante los primeros 20 minutos. En un escenario pesimista, la tasa de evacuación sería de 26% de la población en caso de un evento diurno y de 30 % en caso de un evento nocturno. Para este último caso, la evacuación total de la zona de estudio podría tomar cerca de una hora y media.

Los resultados indican que existen áreas de la ciudad con notorias dificultades para evacuar expeditamente. En particular, el modelo muestra que la zona de la ZOFRI en el norte de la ciudad, el puerto en el noroeste y la península de Cavancha al poniente, tendrían tiempos de evacuación que superarían los 30 minutos en un escenario optimista. Por otra parte, los resultados del modelo de evacuación del centro de Iquique indican que en 20 minutos se completa la evacuación del centro de la ciudad. Finalmente, los resultados de la tercera simulación de un colegio muestran que el tiempo promedio de evacuación de este recinto es de 3 minutos.

6.1 EVACUACIÓN A ESCALA MACRO DE LA CIUDAD

El objetivo de la simulación de evacuación a escala macro es obtener una aproximación a los tiempos requeridos para alcanzar una evacuación peatonal completa de la población vulnerable de Iquique en caso de un tsunami de campo cercano. En esta simulación se utilizó el programa computacional Agent Analyst (Johnston 1013), un programa de uso libre que integra Repast (modelador de agentes) con ArcGIS.

El modelo de agentes utilizado incorpora cinco componentes esenciales: (i) una ubicación espacial de cada persona en riesgo de tsunami (la cual es considerada un “agente”); (ii) un perímetro seguro de calles como destino

de la evacuación; (iii) una ruta de evacuación para cada agente; (iv) un conjunto de reglas para el desplazamiento de los agentes; y (v) un tiempo de partida para cada uno de ellos.

Se consideró como población vulnerable a aquella ubicada entre el borde costero y el perímetro seguro, definido en el plan de emergencia de la Municipalidad de Iquique (SHOA 2011), el cual a su vez está establecido de acuerdo a la carta de inundación del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). El perímetro seguro se observa en la Figura 6.1. Este plan divide a la ciudad de norte a sur en cinco zonas de emergencia, las cuales se

utilizaron como áreas de estudio base en el modelo. La cantidad y distribución espacial de la población se obtuvo a partir del estudio origen-destino desarrollado en Iquique por el Ministerio de Transporte (SECTRA 2010).

Se analizaron dos escenarios críticos: diurno (es decir, un día de semana en un horario punta entre 7:30 y 9:00 AM) y nocturno. Al primero le correspondió un total de 103.881 evacuados, mientras que al segundo 83.331. A cada agente o persona se le asignó la ruta de evacuación más corta posible entre su ubicación inicial y el perímetro seguro. En el modelo se utilizó una velocidad base de los agentes de 1,4 m/s, la cual podía disminuir debido a tres factores. Estos son (i) los cambios de pendiente (mientras más empinada es una ruta más lento es la velocidad); (ii) el tráfico vehicular (calles con más autos implican menor espacio para los peatones y por lo tanto menor velocidad de desplazamiento); y (iii) densidad de evacuados (mayor número de agentes en una misma área implica potenciales puntos de congestión y menor velocidad).

Con respecto al tiempo de inicio de la evacuación, se consideraron dos potenciales escenarios. El primero de ellos corresponde a un escenario optimista donde todos los agentes comienzan a evacuar inmediatamente una vez concluido el terremoto. El segundo escenario corresponde a un caso pesimista donde pocos agentes parten inmediatamente, seguido por un rápido incremento para finalmente disminuir hasta completar la evacuación. Este escenario es de tipo probabilístico porque el tiempo de inicio de la evacuación fue modelado utilizando la función de distribución de probabilidades de Rayleigh, definida a partir de un tiempo medio de partida del total de evacuados igual a 20 minutos. Como cada uno de los agentes escoge aleatoriamente un tiempo de partida según la distribución de Rayleigh, el tiempo total de evacuación para Iquique cambia al hacer una nueva simulación. Para recoger este efecto estocástico, el modelo fue ejecutado 50 veces, calculándose un tiempo de evacuación resultante promedio.

Las Figuras 6.1 y 6.2, y las Tablas 6.1 y 6.2 resumen los resultados del modelo de agentes. Estos resultados muestran que en el escenario favorable, en que la población

inicia el proceso de evacuación de manera inmediata el evento, la tasa de evacuación de la población es cercana al 90% durante los primeros 20 minutos. Si se considera el escenario pesimista, la tasa de evacuación es del 26% de la población en caso de un evento diurno y un 30% en caso de un evento nocturno. Para este último caso, una evacuación completa de Iquique podría tomar cerca de una hora y media.

Los resultados muestran también que existen áreas de la ciudad con notorias dificultades para evacuar expeditamente. En particular, el modelo muestra que la zona de la ZOFRI en el norte de la ciudad, el puerto en el noroeste y la península de Cavanha al poniente, tendrían tiempos de evacuación que incluso en un escenario optimista superarían los 30 o 40 minutos. Sin embargo, para el instante de ocurrencia de la máxima ola a los 110 min (Figura 4.7) se espera que la evacuación haya terminado.

Figura 6.1

Zonas de estudio y tiempos optimistas de evacuación en Iquique.

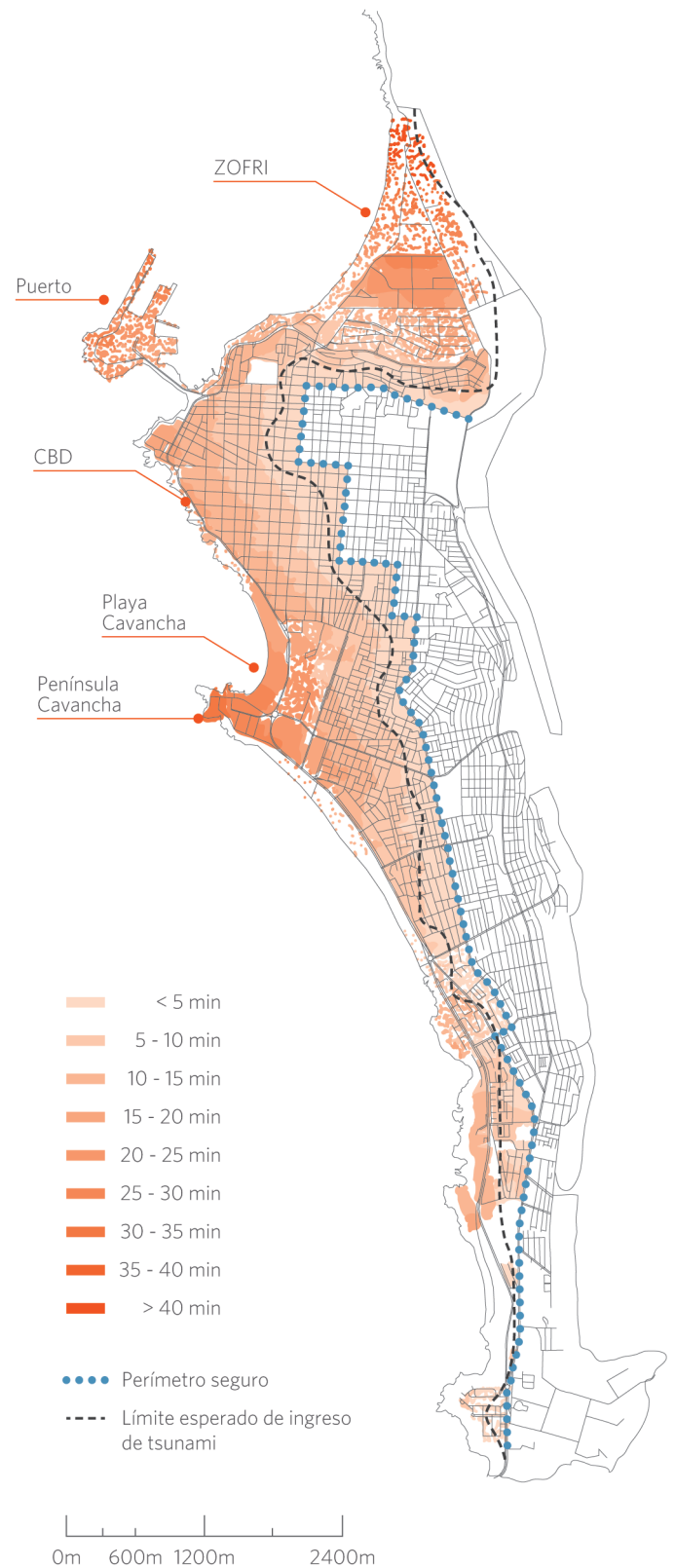


Tabla 6.1

Tiempos de evacuación total en Iquique para escenario optimista.
Casos diurno y nocturno.

IQUIQUE		Diurno		Nocturno	
Zona	Uso de suelo principal	Número de evacuados	Tiempo (min) total requerido para evacuación	Número de evacuados	Tiempo (min) total requerido para evacuación
1	ZOFRI + residencial	16.840	42	14.352	42
2	CBD + puerto	34.543	36	20.483	33
3	Residencial + playa + servicios	31.015	28	25.873	25
4	Residencial + servicios	22.556	33	18.960	33
5	Residencial	3.927	17	3.663	17

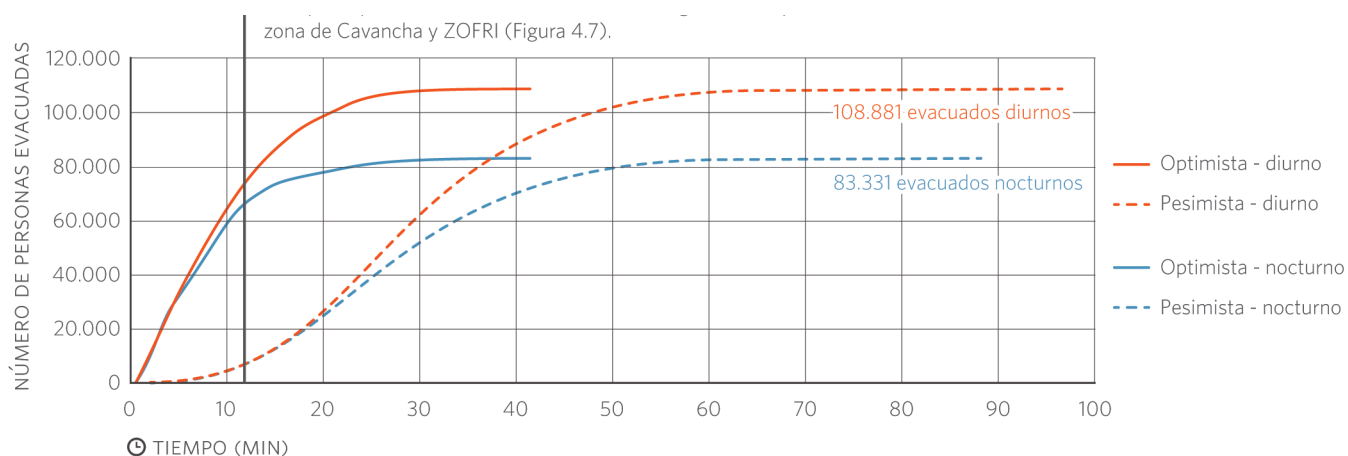
Tabla 6.2

Tiempos promedio de evacuación total en Iquique para escenario pesimista.
Casos diurno y nocturno.

IQUIQUE		Diurno			Nocturno		
Zona	Uso de suelo principal	Número de evacuados	Tiempo promedio (min)	Derivación estándar (min)	Número de evacuados	Tiempo promedio (min)	Derivación estándar (min)
1	ZOFRI + residencial	16.840	88,1	3,54	14.352	69,8	3,27
2	CBD + puerto	34.543	81,8	2,49	20.483	79,2	1,61
3	Residencial + playa + servicios	31.015	80,8	1,49	25.873	76,9	1,86
4	Residencial + servicios	22.556	84,9	2,19	18.960	85,6	1,82
5	Residencial	3.927	68,5	1,12	3.663	68,1	1,47

Figura 6.2

Número de evacuados versus tiempo en Iquique, escenarios optimista y pesimista.
Casos diurno y nocturno..

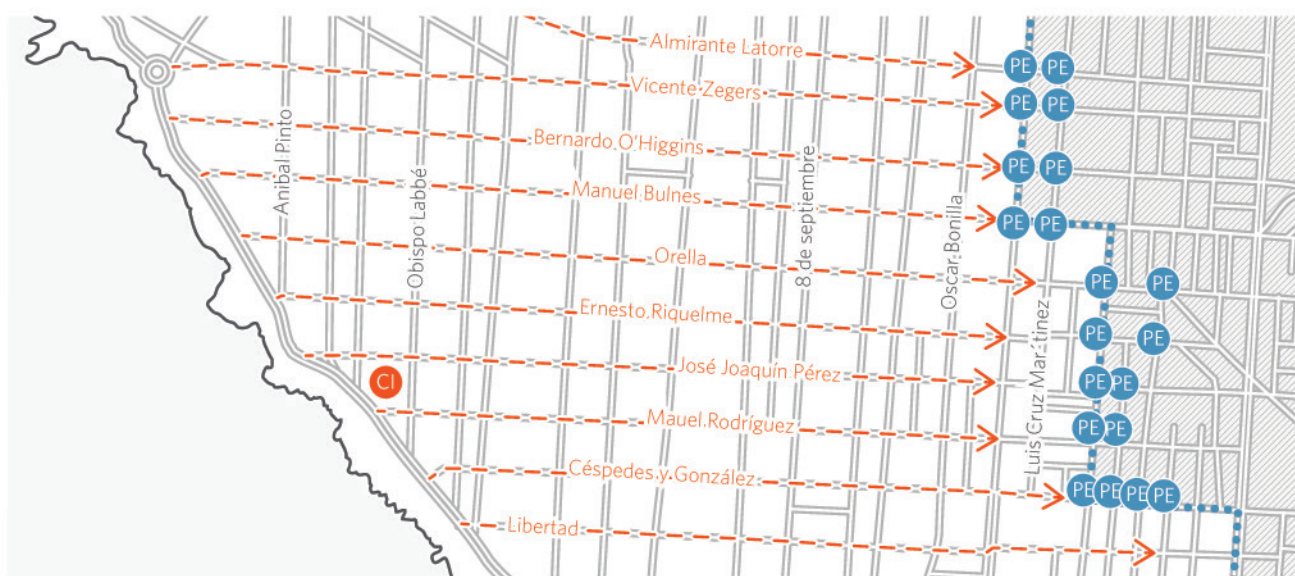


6.2 EVACUACIÓN DETALLADA DEL CENTRO DE LA CIUDAD

Para estudiar en mayor detalle el proceso de evacuación del centro de la ciudad se escogió una zona del casco histórico de Iquique, como se muestra en la Figura 6.3. El objetivo de utilizar un espacio geográfico reducido es modelar de manera más precisa el comportamiento de los agentes al momento de evacuar, considerando tanto la interacción entre ellos, como con los automóviles y los escombros generados por el terremoto.

Figura 6.3

Sección de la ciudad considerada en la evacuación detallada del centro de la zona de la ciudad. Las líneas rojas representan las rutas de evacuación sugeridas por Onemi, mientras los círculos azules indican los puntos de encuentro en la zona segura. El punto anaranjado "CI" indica la ubicación del Colegio Inglés.



Para el modelamiento de la evacuación del centro de Iquique se consideraron dos tipos de agentes: personas y automóviles. Cada agente tiene como objetivo llegar a la zona segura más cercana a su posición en la ciudad. La modelación del movimiento de los agentes se realizó utilizando un algoritmo que evita las colisiones y superposiciones entre ellos (Van Den Berg et al. 2011). Una de las ventajas de utilizar esta metodología es la posibilidad de capturar

la congestión en las rutas debido al angostamiento de las vías o a la presencia de objetos caídos.

En adición a las diferentes propiedades asignadas a vehículos y peatones (por ejemplo, rapidez máxima), a los vehículos se les obligó a respetar el sentido de las calles. Esta característica no sólo produce que los vehículos que se mueven hacia la costa rápidamente giren en alguna calle para evacuar, sino que también provoca un contraflujo que puede generar congestión durante la evacuación.

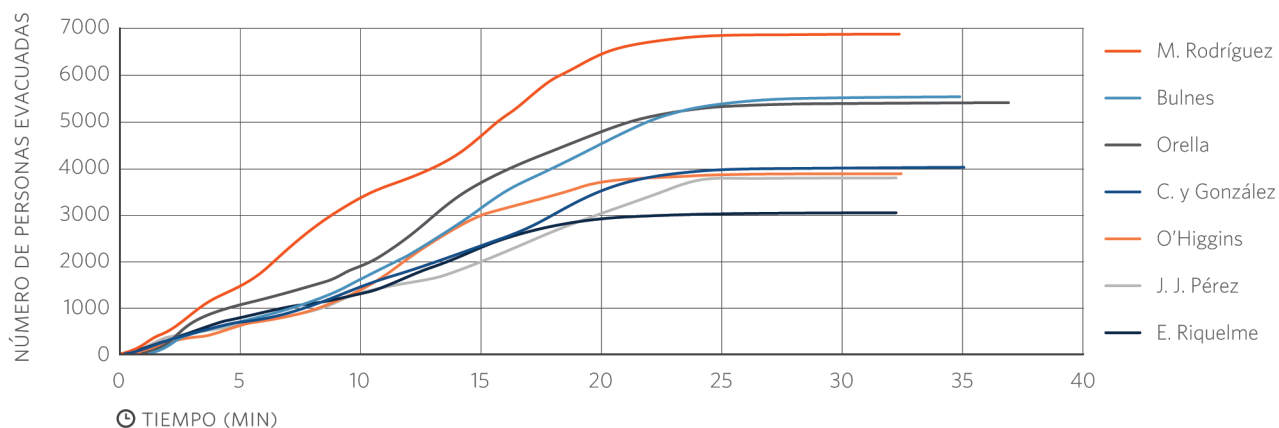
Los escombros en la ruta se estimaron con el programa HAZUS (FEMA, 2015). Para transformar los escombros a volumen de material se utilizó la recomendación de FEMA 329 (FEMA 2010). La distribución de escombros alrededor de cada cuadra se estimó utilizando la metodología de Argyroudís *et al.* (2010), en donde el área afectada por los escombros se determina asumiendo una distribución de probabilidades.

Finalmente, la distribución de la población en los distintos edificios se realizó con base en la información de la encuesta origen-destino (SECTRA) y el registro de matrículas de los colegios y jardines infantiles de Iquique. Con esta información se estimó un total de 30.000 personas en la zona de estudio (Figura 6.3). En la simulación se consideró 29.000 personas ubicadas dentro de los edificios y 1.000 personas distribuidas uniformemente en el exterior. Adicionalmente, se consideraron 2.500 vehículos.

Al momento de iniciar la evacuación, las personas salen de cada edificio con una tasa constante y se dirigen hacia los puntos de encuentro (PE) mostrados en la Figura 6.3. En la Figura 6.4 se muestra el número acumulado de personas en función del tiempo (curvas de evacuación) obtenidas en las siete calles interiores de la zona escogida, donde se observa que en 20 minutos se logra una evacuación del 95% de las personas.

Figura 6.4

Curvas de evacuación en siete calles del centro de Iquique.



6.3 EVACUACIÓN DE COLEGIO EN ZONA CRÍTICA

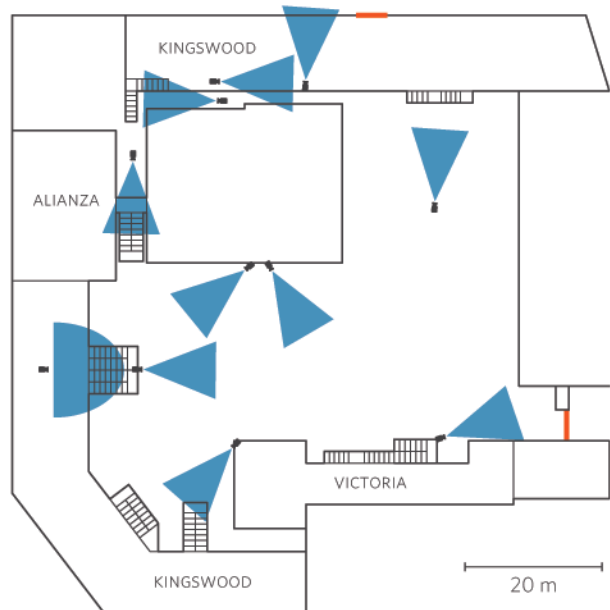
En esta sección se resume la simulación de la evacuación de un colegio ubicado en la costa de Iquique. Más información está disponible en Poulos (2014), Poulos *et al.* (2017) y Tocornal *et al.* (2015). La evacuación se simula con un modelo de agentes. En cada instante de tiempo, los agentes o personas evalúan su entorno y actúan según un conjunto de reglas predefinidas (Bonabeau 2002). Para el caso de evacuación, el desplazamiento de cada agente en cada instante de tiempo se define en dos etapas. En primer lugar, cada agente selecciona una ruta global de evacuación, que corresponde a la ruta más corta desde su ubicación a las salidas (del colegio en este caso) que conoce. En una segunda etapa, luego que las rutas de todos los agentes han sido calculadas, las velocidades de los agentes son seleccionadas evitando colisiones con otros agentes y obstáculos estáticos según la metodología propuesta por Van Den Berg *et al.* (2011).

El modelo de evacuación desarrollado se aplicó en un colegio expuesto a tsunamis, puesto que está ubicado a 70 metros de la costa y a aproximadamente 1,5 km de la zona de seguridad definida por SHOA. En agosto de 2013, se hizo un simulacro de evacuación en Iquique y en este colegio se realizaron mediciones del proceso de evacuación (Walker 2013). Se eligió un colegio para validar el modelo propuesto porque los atributos de los agentes son conocidos (edad y posición al inicio de la evacuación), lo que hace más realista la comparación entre lo medido en terreno durante el simulacro con la predicción del modelo. El colegio tiene alrededor de 1500 alumnos entre 4 y 18 años de edad y cuenta con cinco edificios. La Figura 6.5 a) muestra una vista en planta del colegio donde se identifican los cinco edificios. Cuatro de estos edificios contenían personas al inicio del simulacro.

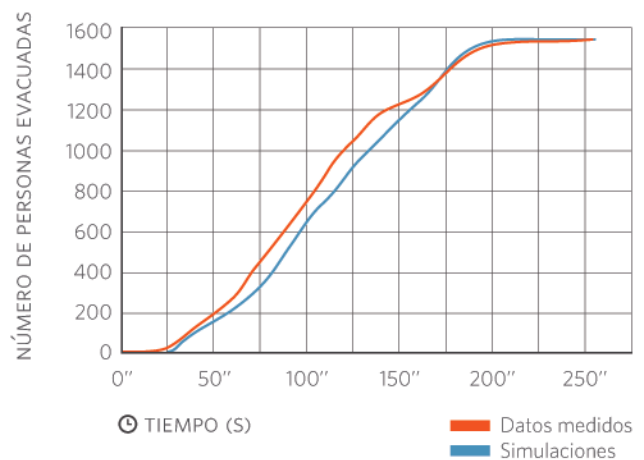
Para registrar el proceso de evacuación durante el simulacro se instalaron cámaras en diversos puntos de interés del colegio. La Figura 6.5 a) muestra la ubicación de las cámaras, las que fueron utilizadas para medir el flujo de personas en escaleras y salidas del colegio.

Figura 6.5

(a) Planta esquemática del colegio con ubicación de cámaras de monitoreo.



(b) Comparación de la salida de personas del colegio en el simulacro y en 25 simulaciones del modelo de evacuación.



La Figura 6.5 b) muestra la cantidad acumulada de personas que salieron del colegio en función del tiempo desde que sonó la alarma de tsunami. En la misma figura se presenta el promedio del modelo de evacuación obtenida de 25 simulaciones. La variabilidad obtenida en las simulaciones se debe a que la rapidez y posición inicial de los agentes dentro de las salas se asignan de forma estocástica. La Figura 6.5 b) muestra que los resultados de la simulación y los datos experimentales son similares. El error en la predicción del tiempo total de evacuación (t_1) es de 1%. La Tabla 6.3 resume la comparación de los tiempos de evacuación para los cuatro edificios del colegio, donde el error promedio en la estimación de los tiempos de evacuación de los edificios es de 5,9%.

Con el fin de presentar la dinámica del modelo en forma gráfica, la Figura 6.6 muestra una simulación del edificio Victoria en cuatro diferentes instantes de tiempo. Al principio todos los alumnos (círculos rojos) están dentro de las salas de clases. En el instante $t = 20$ s una de las salas ya comenzó a evacuar y el instante $t = 40$ s muestra a todas las salas evacuando. En el último cuadro ($t = 60$ s) todos los estudiantes están bajando las escaleras (zonas naranjas) y el edificio está pronto a estar desocupado.

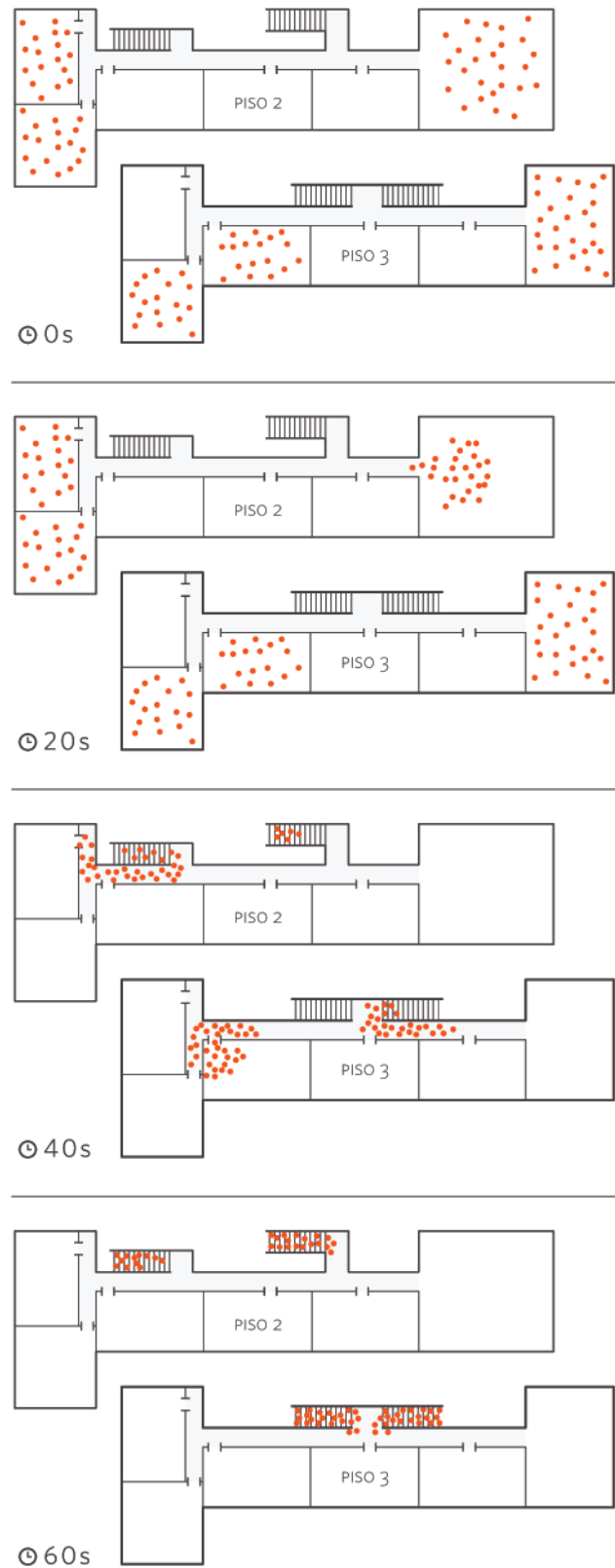
Los resultados obtenidos para el simulacro del colegio sugieren que el modelo desarrollado es una buena herramienta predictiva y de análisis del comportamiento de evacuación de personas en edificios.

Tabla 6.3

Características de cada edificio y tiempos de evacuación (t_f).

EDIFICIO	Nº pisos	Área/piso (m ²)	Nº personas	t_f		
				Simulacro	Modelo	Error (%)
Humberstone	3	754	236	1:58	2:06	6.5
Alianza	3	331	167	2:22	2:18	2.2
Kingswood	4	766	540	2:39	2:34	3.0
Victoria	3	210	167	1:31	1:20	11.8
Colegio	-	-	1545	3:51	3:49	1.0

Figura 6.6
Simulación de evacuación del edificio Victoria
en cuatro instantes de tiempo.



7 CONCLUSIONES

Este documento caracteriza un escenario sísmico extremo que podría ocurrir en las cercanías de Iquique y resume las posibles consecuencias en el entorno físico y social. La generación de escenarios sísmicos permite simular los posibles efectos que tendrían potenciales terremotos y por lo tanto se pueden utilizar como herramienta para establecer estrategias de mitigación de modo de minimizar el posible impacto de terremotos futuros sobre la sociedad. Este documento contiene el resultado de un trabajo multidisciplinario realizado en el Centro CIGIDEN.

Para estimar los efectos de un escenario sísmico se requiere de un inventario georreferenciado de los elementos en riesgo. En Iquique se estimaron 33.400 edificaciones, de las cuales 88,4% son del tipo residencial y 10,2% del tipo comercial. Adicionalmente se caracterizó la red de salud, los centros educacionales, carabineros y los centros gendarmería. Respecto a la caracterización demográfica se estimó una población diurna en Iquique de 186.000 habitantes y se estimaron mapas de vulnerabilidad social.

El posible escenario sísmico de magnitud de momento de 8,9 se estimó mediante el análisis de la sismicidad histórica, modelos de acoplamiento geodésicos y modelos de acoplamiento obtenidos mediante anomalías de gravedad. El área de ruptura de este terremoto es 108.000 km², el centroide se ubicaría al sur de la ciudad de Iquique y la profundidad del foco sería 21 km. La duración del terremoto se estimó en 200 segundos y la aceleración máxima del suelo (PGA) en Iquique variaría entre 0,38 g y 0,62 g dependiendo de las características locales del suelo.

El escenario sísmico generaría un tsunami cuya máxima onda de 5,5 metros de altura se generaría luego de 110 minutos después de ocurrido el evento. Sin embargo, las simulaciones numéricas estiman que sectores bajos de la zona norte de la ciudad serían inundados por una primera

onda antes de 20 minutos después de ocurrido el evento. Adicionalmente, los mapas de inundación generados permiten predecir la infraestructura crítica que sería inundada. En consecuencia, estos mapas son una herramienta para la toma de decisiones respecto al traslado de infraestructura crítica o a los permisos de edificación en zonas inundables.

El movimiento del suelo generaría un impacto significativo en las edificaciones de la ciudad. Se estima que el 40% de las viviendas residenciales experimentarían una pérdida total y que el 58% de los centros educacionales y de salud sufrirían pérdida de funcionalidad. El daño en establecimientos educacionales dejaría a aproximadamente 6.500 estudiantes sin acceso a la educación y a otros servicios prestados por las escuelas públicas. Estas estimaciones se pueden utilizar para tomar decisiones respecto al mejoramiento estructural de infraestructura, de modo de disminuir el posible impacto ante eventos sísmicos futuros.

Las simulaciones de procesos de evacuación permiten estimar el tiempo requerido por la población en estos procesos. En este documento se simulan procesos de evacuación a tres escalas diferentes, desde una escala macro de evacuación de la ciudad completa hasta una escala micro de evacuación de un colegio. El resultado del modelo macro de la ciudad estima que la tasa de evacuación hacia el perímetro seguro sería cercana al 90% de la población durante los primeros 20 minutos. Se concluye que las simulaciones realizadas son una herramienta relevante para la toma de decisiones respecto a procesos de evacuación. Estas simulaciones permitirían por ejemplo, estimar el impacto que tendría tener vías más despejadas, o el impacto que tendría colocar una escalera adicional en un colegio en los tiempos de evacuación.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N., Gregor, N., & Addo, K. (2016). *BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes*. Earthquake Spectra. Vol. 32, No. 1, pp. 23-44.
- Aldrich, N., Benson, W. F. (2005). *Peer reviewed: disaster preparedness and the chronic disease needs of vulnerable older adults*. Preventing Chronic Disease. Vol. 5, No. 1, A27.
- APPIA XXI Ingenieros y Arquitectos Consultores (2012). *Estudio: Actualización Diagnóstico del S.T.U. de la ciudad de Iquique*. SECTRA, Consultado en línea en: <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca>.
- Argyroudis, S., Selva, J., Gehl, P., Pitilakis, K. (2015). *Systemic seismic risk assessment of road networks considering interactions with the built environment*. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering. Vol. 30 No. 7, pp. 524-540.
- Armas, I., Gavris, A. (2013). *Social vulnerability assessment using spatial multi-criteria analysis (SEVI model) and the Social Vulnerability Index (SoVI model)-a case study for Bucharest, Romania*. Natural Hazards and Earth System Sciences. Vol. 13, No. 6. pp-1481.
- Becerra, A., Podestá, L., Monetta, R., Saez, E., Leyton, F., Yáñez, G. (2015). *Seismic microzoning of Arica and Iquique, Chile*. Natural Hazards, Vol. 79, No. 1, pp. 567-586.
- Béjar-Pizarro, M., Carrizo, D., Socquet, A., Armijo, R., Barrientos, S. E., Bondoux, F., Bonvalot, S., Campos, J., de Chabaliér, J. B., Charade, O., Delorme, A., Gabalda, G., Galetzka, J., Genrich, J., Necessian, A., Olcay, M., Ortega, F., Ortega, I., Remy, D., Ruegg, J. C., Simons, M., Valderas, C., Vigny, C. (2010). *Asperities and barriers on the seismogenic zone in North Chile: state-of-the-art after the 2007 Mw 7.7 Tocopilla earthquake inferred by GPS and InSAR data*. Geophysical Journal International, Vol. 183, No. 1, pp. 390-406.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B. (1994). *At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge, Londres.
- Bonabeau, E. (2002). *Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems*. Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 99, No. 3, pp. 7280-7287.
- Bravo, D., Larrañaga, O. and Millán, I., Zamorano, F. (2013). *Informe Final Comisión Revisora del Censo 2012*.
- Chlieh, M., Perfettini, H., Tavera, H., Avouac, J. P., Remy, D., Nocquet, J. M., Bonvalot, S. (2011). *Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Vol. 116, Vol. B12.
- Chlieh, M., de Chabaliér, J. B., Ruegg, J. C., Armijo, R., Dmowska, R., Campos, J., Feigl, K. L. (2004). *Crustal deformation and fault slip during the seismic cycle in the North Chile subduction zone, from GPS and InSAR observations*. Geophysical Journal International, Vol. 158, No. 2, pp. 695-711.
- Collins, T. W., Jimenez, A. M., & Grineski, S. E. (2013). *Hispanic health disparities after a flood disaster: Results of a population-based survey of individuals experiencing home site damage in El Paso (Texas, USA)*. Journal of Immigrant and Minority Health. Vol. 15, No. 2, pp. 415-426.
- Comte, D., Pardo, M. (1991). *Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps*. Natural Hazards, Vol. 4, No. 1, pp. 23-44.
- Cutter, S. L., Holm, D., Clark, L. (1996). *The role of geographic scale in monitoring environmental justice*. Risk Analysis, Vol. 16, No. 4, pp. 517-526.
- Cutter, S.L., Mitchell, J. T., Scott, M. S. (2000). *Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina*. Annals of the Association of American Geographers. Vol. 90, No. 4, pp. 713-737.
- Enarson, E., Scanlon, J. (1999). *Gender patterns in flood evacuation: A case study in Canada's Red River Valley*. Applied Behavioral Science Review. Vol. 7, No. 2, pp. 103-124.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA (2010). *Debris Estimating Field Guide*. FEMA Publication No. 329, September 2010.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA (2015). *Hazus-MH 2.1, Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Earthquake Model, Technical Manual, January 2015*. Department of Homeland Security, Mitigation Division, United States.
- Fothergill, A. (1996). *Gender, risk, and disaster*. International Journal of Mass Emergencies and Disasters. Vol. 14, No. 1, pp. 33-56.
- General Bathymetric Charts of the Ocean (2015)*. Consultado en línea en: <http://www.gebco.net>.
- Hewitt, K. (1997). *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*. Essex, UK, Longman.
- Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2012). *Censo 2012*.
- Instituto Nacional de Estadísticas, INE (2014). *Proyecciones de Población 2014*. Consultado en línea en: <http://www.ine.cl>.
- JICA (2016). *Guía para la estimación de Peligro de Tsunamis*. SATREPS Tsunami Serie de Publicaciones, Vol 1.
- Johnston, K.M. (2013). *Agent Analyst, Agent-based modeling in ArcGIS*. Esri Press, Redlands, California.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., Fukushima, Y. (2006). *A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 96, No. 3, pp. 879-897.
- Khazaradze, G., Klotz, J. (2003). *Short and long term effects of GPS measured crustal deformation rates along the south central Andes*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. Vol. 108(B6).

- Loveless, J. P., Pritchard, M. E. (2008). *Motion on upper plate faults during subduction zone earthquakes: Case of the Atacama Fault System, northern Chile*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 9, No. 12, pp. 1-23.
- McGuire, L.C., Ford E. S., Okoro, C. A. (2007). *Natural disasters and older US adults with disabilities: implications for evacuation*. *Disasters*, Vol. 31, No. 1, pp. 49-56.
- Metois, M., Vigny, C., Socquet, A. (2016). *Interseismic coupling, megathrust earthquakes and seismic swarms along the Chilean subduction zone (38-18 S)*. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 173, No. 5, pp. 1431-1449.
- Mileti, D.S., O'Brien, P. W. (1992). *Warnings during disaster: Normalizing communicated risk*. National Emergency Training Center.
- Ministerio de Economía de Chile (2015). Consultado en línea de <http://www.ide.cl/descargas/capas/economia/norte.rar>.
- Ministerio de Salud (2011). Descargado en línea de: <http://www.bibliotecaminsal.cl/wp/wp-content/uploads/2011/09/Historia-Hospital-Dr.-Ernesto-Torres-Galdames-de-Iquique.pdf>.
- Ministerio de Salud (2012). *DEIS: Departamento de Estadísticas e Información en Salud*. Consultado en línea de: <http://www.deis.cl/>
- Ministerio de Salud (2013). *Departamento de Estadísticas e Información en Salud*. Consultado en línea de: http://intradeis.minsal.cl/egresoshospitales/menu_publica_nueva/menu_publica_nueva.htm.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, MINVU (2014). *Vivienda Social en Copropiedad, Catastro Nacional de Condominios Sociales, Marzo 2014*, ISBN: 978-956-9432-07-1.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile, MINVU (2014b). *Catastro de conjuntos habitacionales de altura*. Datos obtenidos mediante Ley de Transparencia, solicitud CAS-2865097-L8X8M6, Octubre de 2014.
- Morrow, B.H., Phillips, B. D. (1999). *What's gender got to do with it?*. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*. Vol. 17, No. 1, pp. 5-13.
- National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP), (1997). *Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures*. Washington, US, 997 p.
- Ngo, E.B. (2012). *When disasters and age collide: Reviewing vulnerability of the elderly*. *Natural Hazards Review*. Vol. 2, No. 2, pp. 80-89.
- Okada, Y. (1985). *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space*. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 75, No. 4, pp. 1135-1154.
- Peacock, W., Morrow, B. H., Gladwin, H. (1997). *Hurricane Andrew and the reshaping of Miami: Ethnicity, gender, and the socio-political ecology of disasters*. University Press of Florida.
- Poulos A. (2014). *Risk model of human evacuation under earthquake loads*. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Poulos, A., Llera, J. C., Mitrani Reiser, J. (2017). *Earthquake risk assessment of buildings accounting for human evacuation*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Vol. 46, No. 4, pp. 561-583.
- Pritchard, M. E., Norabuena, E. O., Ji, C., Boroschek, R., Comte, D., Simons, M., Dixon, T. H., Rosen, P. A. (2007). *Geodetic, teleseismic, and strong motion constraints on slip from recent southern Peru subduction zone earthquakes*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B03307.
- Rosenkoetter, M., Covan, E. K., Cobb, B. K., Bunting, S., Weinrich, M. (2007). *Perceptions of older adults regarding evacuation in the event of a natural disaster*. *Public Health Nursing*. Vol. 24, No. 2, pp. 160-168.
- Santa María, H., Hube, M.A., Rivera, F., Yepes-Estrada, C., Valcárcel, J.A. (2017). *Development of national and local exposure models of residential structures in Chile*. *Natural Hazards*, Vol. 86, pp. S55-S79.
- SECTRA (2014). *Encuestas de movilidad de centros urbanos*. Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Consultado en línea en: <http://sintia.sectra.gob.cl/>, acceso 12/01/2014.
- Servicio de Impuestos Internos, SII (2015). *Base catastral de bienes raíces en Iquique*. Datos obtenidos mediante Ley de Transparencia, solicitud AE006W50008406, mayo de 2015.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA (2011). *Plano actualizado año 2011 basado en la carta de inundación, Plano Iquique*. TSU-104, 2da Edición, Abril.
- Sladen, A. (2013). *Preliminary Result 11/14/2007 (Mw 7.7), Tocopilla Earthquake, Chile*. Source Models of Large Earthquakes. Consultado en línea de: http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2007_tocopilla/tocopilla.html. Accedido el 1 de julio de 2013.
- Song, T. R. A., Simons, M. (2003). *Large trench-parallel gravity variations predict seismogenic behavior in subduction zones*. *Science*, 301(5633), 630-633.
- Tocornal, F., Poulos, A., de la Llera, J. C., Mitrani-Reiser, J., Rivera, F. (2015). *Modelamiento de la evacuación de un colegio en Iquique*. En XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica, marzo 18-20, Santiago, Chile.
- Van Den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., Manocha, D. (2011). *Reciprocal n-body collision avoidance*. In *Robotics research* (pp. 3-19). Springer Berlin Heidelberg.
- Vásquez, A., Kronmüller, E. (2015). *Configuración espacial de la vulnerabilidad socio-territorial ante un desastre natural: el caso de Iquique y el terremoto 2014*. En XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica, marzo 18-20, Santiago, Chile.
- Vásquez, A., Rivera, F., De la Llera, J.C., Mitrani-Reiser, J. (2017). *Healthcare network operation in Iquique after the 2014, Pisagua earthquake*. *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper N°3639, January 9th to 13th, Santiago, Chile.
- Walker, J. M. (2013). *Informe técnico de evaluación, simulacro macrozona de terremoto y tsunami, evacuación del borde costero, regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, 8 de Agosto de 2013*. Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Santiago, Chile.
- Wei, S. (2014). *Apr./01/2014 (Mw 8.1), Iquique, Chile*. Source Models of Large Earthquakes. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2014_chile/index.html. Accedido el 18 de mayo de 2014.

White, G.W., Rooney, C., Cahill, A. (2007). *Assessing the impact of Hurricane Katrina on persons with disabilities*. University of Kansas and University of New Mexico.

Yagi, Y., Okuwaki, R., Enescu, B., Hirano, S., Yamagami, Y., Endo, S., Komoro, T. (2014). *Rupture process of the 2014 Iquique Chile earthquake in relation with the foreshock activity*. Geophysical Research Letters, Vol. 41, No. 12, pp. 4201-4206.

Yamazaki, Y., Kowalik, Z., Cheung, K. F. (2009). *Depth integrated, non hydrostatic model for wave breaking and run up*. International Journal for Numerical Methods in Fluids. Vol. 61 No. 5, pp. 473-497.

Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Kowalik, Z. (2011). *Depth integrated, non hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run up*. International Journal for Numerical Methods in Fluids. Vol. 67 No. 12, pp. 2081-2107.



CIGIDEN

Centro de Investigación
para la Gestión Integrada
del Riesgo de Desastres