

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil



ESTIMACIÓN DE DAÑOS POR TSUNAMI EN LA BAHÍA DE COQUIMBO

EVELYN CAROLINA PEDRERO DURÁN

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Dr. Rafael Aránguiz Muñoz

Profesor Informante

M. Eng. Mauricio Villagrán Valenzuela

Concepción, Diciembre 2016

Chile

Resumen

En el presente trabajo se realizó una predicción de daños en estructuras utilizando las características hidrodinámicas del flujo de inundación de un modelo esperado. El estudio se realizó en la ciudad de Coquimbo ya que este sector presenta una brecha sísmica que nos alerta de la probabilidad de que un futuro se produzcan eventos que puedan generar un tsunami y que este inunde las costas de Coquimbo, al igual o en mayor proporción a como ocurrió el pasado 16 de septiembre del 2015. El primer paso necesario para realizar la predicción fue reunir información topobatemétrica de la zona de estudio y la realización de un levantamiento topográfico, estos datos fueron procesados para obtener grillas con una resolución suficiente para elaborar una simulación del evento. Finalizado lo anterior se procedió a realizar un análisis de la sismicidad de la zona para así determinar posibles eventos que podrían afectar en un futuro a la ciudad de Coquimbo y los parámetros necesarios para definirlos. Por último se realizó una simulación numérica utilizando el software NEOWAVE para obtener mapas de inundación para los eventos propuestos, y estos resultados fueron combinados con la curva de fragilidad que se tiene de la zona de estudio (Urrea et al., 2016), obteniéndose así mapas de inundación y mapas de daños para dos de los tres eventos propuestos.

Los resultados mostraron que en un evento de 7.8 Mw no afecta de manera significativa a la ciudad de Coquimbo, sin embargo un evento de magnitud 8.0 Mw o 8.2 Mw provoca inundaciones que son necesarias de analizar. Un evento de 8.0 podría inundar 596 edificaciones y de ellas al menos el 30% tendría una alta probabilidad de daño, mientras que un evento de magnitud 8.2 podría llegar a inundar 613 edificaciones y de ellas al menos el 77% podría ser considerada con una alta probabilidad de daño.

Abstract

In this work a prediction of damages in structures is made using the hydrodynamic characteristics of the flood of an expected model. The study was carried out in the city of Coquimbo since this sector presents a seismic gap that alerts us to the probability of a future occurring events that can generate a tsunami and that this floods the Coquimbo coast, in minor or in a greater proportion as happened on 16 September 2015. The first step necessary to carry out the prediction was to gather topobathymetric information from the study area and to perform a topographic survey, these data were processed to obtain grids with a sufficient resolution to elaborate a simulation of the event. After completing the above, an analysis of the seismicity of the area was carried out to determine possible events that could affect the city of Coquimbo in the future and the parameters necessary to define them. Finally, a numerical simulation was performed using NEOWAVE software to obtain flood maps for the proposed events, and these results were combined with the fragility curve of the study area, thus obtaining flood maps and damage maps for two of the three events proposed.

The results showed that in an event of 7.8 Mw does not significantly affect the city of Coquimbo, however an event of magnitude 8.0 Mw or 8.2 Mw causes floods that are necessary to analyze. An event of 8.0 Mw could flood 596 buildings and of them at least 30% would have a high probability of damage, while an event of magnitude 8.2 Mw could flood 613 buildings and of them at least 77% could be considered A high probability of damage.

Agradecimientos

Primeramente agradezco a Dios, porque sin él nada de esto sería posible.

A:

Mis padres Cristina Durán Ramírez y Orlando Pedrero Urrutia, por apoyarme incondicionalmente, por entregarme valores y guiarme día a día para alcanzar mis anhelos.

Mi hermano Richard Pedrero Durán por motivarme, apoyarme y estar siempre a mi lado a pesar de la distancia.

Ayleen López Briones, por los más de 15 años de amistad, quien ha estado siempre a mi lado, apoyándome en todo lo que me propongo y con quien comparto un sin número de gratos recuerdos.

Juan Borquéz Sánchez por tu apoyo incondicional, por la confianza que has depositado en mí, por los momentos gratos y las anécdotas que hemos compartido.

Tatiana Faundez Pradenas porque aunque pase el tiempo, y se haga más difícil vernos, la amistad sigue estando presente como el primer día.

Mis amigos de la universidad: Jael Millan, Karla Contreras, Luis Pérez, Karen Leal, Evans Aravena y Diego Espinoza, por compartir conmigo momentos gratos y porque sin ustedes no podría haber llegado a donde estoy.

Al profesor Rafael Aránguiz por la paciencia, por el apoyo y por la guía entregada durante todo el proceso de este proyecto.

Y por último se agradece al proyecto FONDECYT N°11140424 por su apoyo económico durante el desarrollo de este proyecto.

Contenido

Índice de Figuras.....	6
Índice de Tablas.....	8
1. Introducción.....	9
1.1 Motivación	9
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo General.....	13
1.2.2 Objetivos Específicos	13
1.3 Caracterización de la zona de estudio.....	13
2. Marco Teórico	16
2.1 Mecánica de Ondas	16
2.1.1 Parámetros de caracterización de las ondas de tsunami.....	16
2.2 Tsunamis.....	18
2.2.1 Generación de los terremotos.....	18
2.2.2 Generación de los tsunamis.....	19
2.2.3 Física de tsunami	20
2.2.4 Formulación de Okada.....	22
2.2.5 Propagación del tsunami.....	23
2.2.6 Variables Importantes.....	24
2.2.7 Alturas de Inundación.....	27
2.3 Modelo Numérico	28
2.3.1 Definición del modelo numérico	28
2.3.2 Duración de la simulación y tiempo de integración.	29
2.3.3 Fuente Homogénea o Heterogénea de la zona de ruptura.....	30
2.3.3 NEOWAVE	32
2.3.4 Definición de las mallas y fuentes de información.....	33

2.4 Mapas de inundación	34
2.5 Método de estimación de daños	36
2.5.1 Estimación de daño por Koshimura	36
2.5.2 Curvas de fragilidad.....	37
3. Materiales y Método.....	41
3.1 Mapas de inundación	41
3.1.1 Recopilación de la información topo-batimétrica y generación de mallas	41
3.1.2 Validación de las mallas	46
3.1.3 Escenarios propuestos	47
3.2 Curvas de Fragilidad	51
3.2.1 Clasificación de estructuras	51
3.2.2 Estimación de daños	53
4. Resultados	57
4.1 Validación de las mallas.....	57
4.2 Simulación de los eventos propuesto	59
4.2.1 Simulación 1 (S1)	60
4.2.2 Simulación 2 (S2)	61
4.2.3 Simulación 3 (S3)	63
4.3 Estimación de daños	64
4.3.1 Estimación de daños para S2	66
4.3.2 Estimación de daños para S3	68
5. Conclusiones.....	72
6. Referencias	74

Índice de Figuras

Figura 1: Línea de tiempo de sismos en Chile.	12
Figura 2: Localización de la zona de estudio, Coquimbo, IV Región, Chile.	14
Figura 3: Coquimbo antes y después del tsunami ocurrido el 16 de septiembre del 2015	15
Figura 4: a) Placas tectónicas, b) Cinturón de fuego del Pacífico.	16
Figura 5: Esquema de los parámetros de caracterización de las ondas.	17
Figura 6: Esquema de un sismo.	18
Figura 7: Zona de subducción.	19
Figura 8: a) Esquema de falla de subducción y deformación de la placa continental, b) Generación de la condición inicial, c) Propagación del tsunami.	20
Figura 9: a) Deformación de la superficie de falla, b) Aproximación a un rectángulo de dimensiones L (Largo) y W (Ancho).	21
Figura 10: Gráfica L y W, formulaciones de Papazachos y Haiyun & Xiabin en comparación con los planos de fallas producidos en Chile.	21
Figura 11: Esquema de la formulación de Okada.	22
Figura 12: Esquema del efecto de la refracción sobre un oleaje.	24
Figura 13: Difracción del oleaje en una zona protegida por un dique.	25
Figura 14: Reflexión del oleaje.	26
Figura 15: Esquema del efecto de asomeramiento en tsunamis.	26
Figura 16: Esquema de las definiciones asociadas con la inundación.	27
Figura 17: Izquierda: Modelo de ruptura rectangular de un segmento (PFM). Derecha: Modelo de ruptura de tres segmentos (FFM).	31
Figura 18: Condición inicial de un Tsunami considerando una fuente homogénea (Izquierda) y una fuente heterogénea (Derecha).	31
Figura 19: Ejemplo de mallas utilizada en un modelo numérico.	34
Figura 20: Ejemplo de profundidad de inundación, resultado obtenido de un modelo numérico.	35
Figura 21: Ejemplo de velocidades de inundación obtenidas de los resultados de un modelo numérico.	35
Figura 22: Clasificación de daños por teledetección según Gokon.	38
Figura 23: Niveles de daño por teledetección según Suppasri.	38
Figura 24: Pasos para la generación de curvas de fragilidad de daño, fuerza y velocidad.	41
Figura 25: Ejemplo de mallas perfectamente anidadas.	42
Figura 26: Ubicación de las cinco mallas a utilizar.	42
Figura 27: a) Ubicación geográfica de la malla 1, b) visualización de la malla 1.	43
Figura 28: a) Ubicación geográfica de la malla 2, b) visualización de la malla 2.	43
Figura 29: a) Ubicación geográfica de la malla 3, b) visualización de la malla 3.	44
Figura 30: a) Ubicación geográfica de la malla 4, b) visualización de la malla 4.	45
Figura 31: a) Ubicación geográfica de la malla 5, b) visualización de la malla 5.	45
Figura 32: Sismos que han afectado con anterioridad al norte de Chile.	47
Figura 33: Escenarios propuestos para Coquimbo.	50
Figura 34: Desarrollo de la curva de fragilidad para Coquimbo. a) Evaluación del daño en las estructuras. b) Profundidad de inundación del tsunami, puntos medidos y la interpolación del área.	51

Figura 35: a) Histograma de las estructuras arrasadas y sobrevivientes., b) Ajuste de mínimos cuadrados para la distribución Log-Normal, c) Ajuste de mínimos cuadrados para la distribución Normal.	52
Figura 36: Curva de fragilidad para Coquimbo	53
Figura 37: Ejemplo de la obtención de la profundidad de inundación asignada a cada casa.	54
Figura 38: a) Asignación de un número a cada edificación., b) Inundación asociada a cada casa., c) Inundación ordenada de forma ascendente.	54
Figura 39: a) Dos casas por tramo., b) Cuatro casas por tramo.	55
Figura 40: PD por tramo considerando cuatro casas por tramo.	55
Figura 41: Casas catalogadas con alta y baja probabilidad de daño y el mapa de daño resultante.	56
Figura 42: Mareógrafo ubicado en la ciudad de Coquimbo	57
Figura 43: Comparación entre la simulación y lo registrado durante el evento del 2015.	58
Figura 44: Rompimiento del segmento para las simulaciones propuestas.	59
Figura 45: Serie de tiempo para S1.	60
Figura 46: Profundidad de inundación para S1, medida en metros.	61
Figura 47: Serie de tiempo para S2	62
Figura 48: Profundidad de inundación en metros sobre la zona de estudio	62
Figura 49: Serie de tiempo para la simulación 3 en centímetros.	63
Figura 50: Profundidad de inundación de la simulación 3	64
Figura 51: Superposición del mapa de inundación para simulación 2 con las edificaciones a considerar.	65
Figura 52: Superposición del mapa de inundación para simulación 2 con las edificaciones a considerar.	65
Figura 53: Distribución de daños en dos niveles para un evento de magnitud 8.0	67
Figura 54: Distribución de daños en dos niveles para un evento de magnitud 8.2.	69

Índice de Tablas

Tabla 1: Sismos en Chile $M_s > 7.5$ entre Valparaíso y Arica.	11
Tabla 2: Parámetros de la formulación de Okada.	22
Tabla 3: Niveles de daño propuestos por Gokon para el método de teledetección.	37
Tabla 4: Clasificación de daño mediante inspección en terreno propuesta por Gokon.	39
Tabla 5: Clasificación de daño mediante inspección en terreno propuesta por Murao.	39
Tabla 6: Clasificación de materialidad por número de pisos y utilización.	40
Tabla 7: Resumen de las mallas utilizadas en las simulaciones NEOWAVE.	46
Tabla 8: Sismos que han afectado al norte de Chile cercanos a zona de estudio.	49
Tabla 9: Escenarios propuestos para Coquimbo.	50
Tabla 10: Parámetros que se utilizaron para generar la curva de fragilidad.	53
Tabla 11: Resultado de los parámetros.	58
Tabla 12: Resultados por tramos para S2.	66
Tabla 13: Resultados por tramos para S3.	68
Tabla 14: Resumen de los mapas de daños.	70

1. Introducción

Chile se caracteriza por ser un país sísmico, esto es debido a que se encuentra ubicado sobre dos placas tectónicas que liberan energía en diferentes sectores cada cierto tiempo generando sismos de diferentes magnitudes. Dependiendo de la ubicación y magnitud de estos sismos se podrían producir tsunamis que afecten a las costas Chilenas.

Hoy en día no existen normas que regulen la construcción de estructuras en zonas costeras, tampoco se realizan evaluaciones de riesgo o vulnerabilidad, y además no se tiene claridad sobre las profundidades de inundación más probables a las que se podría ver afectado cada sector en caso de ocurrir un tsunami.

Debido al uso costero de la ciudad de Coquimbo es importante evaluar adecuadamente la fragilidad de las estructuras que podrían verse afectadas, y así en un futuro considerar los tsunamis para diseñar estructuras próximas a la costa.

Es por ello que la idea principal de este estudio es realizar una predicción de daños en estructuras utilizando las características hidrodinámicas del flujo de inundación de un modelo de tsunami esperado.

1.1 Motivación

Chile es un país que se caracteriza por el uso del borde costero a pesar del riesgo que esto conlleva al tratarse de un país sísmico.

Se tienen registros de terremotos que han generado tsunamis, es por ello que día a día se busca innovar en las consideraciones que se realizan para las construcciones en la costa y en avances para alertar de forma temprana a la población costera cuando se avecina un tsunami.

Los últimos tsunamis que han afectado a Chile (Constitución en el 2010, Iquique en el 2014 e Illapel en el 2015), han demostrado la importancia que tiene el estudio de los tsunamis.

A pesar de que Chile no cuenta con un registro extenso de tsunamis en comparación con Japón, se tiene suficiente experiencia para darle la importancia que este tema amerita. La mayor consecuencia de un tsunami son la cantidad de víctimas fatales que se producen debido a la inundación, sin embargo generando un plan de evacuación y culturizando a la población respecto al tema, se podría disminuir considerablemente la cantidad de víctimas fatales. No obstante la reconstrucción de los sectores afectados por un tsunami puede llegar a tomar años, esto implica que muchas personas se queden sin hogar y/o sin trabajo por largo tiempo. He aquí la importancia de considerar los daños a las estructuras costeras que generan los diferentes niveles de inundación provocados por un tsunami.

El Centro Sismológico Nacional (CSN) muestra en su página web registros de sismos importantes y/o destructivos que afectaron a Chile y que tuvieron lugar desde el año 1570 al 2014. Además con información extraída de United States Geological Survey (USGS), es posible generar la Tabla 1, la que tiene solo en consideración sismos que se han registrado desde Valparaíso hasta Arica con magnitud mayor o igual a 7,5 Mw.

Tabla 1: Sismos en Chile $M_w \geq 7,5$ entre Valparaíso y Arica.

Fuente: (Universidad de Chile, 2016) y (USGS, 2016)

Fecha Local	Latitud	Longitud	Magnitud	Mw	Efecto	Fecha Local	Latitud	Longitud	Magnitud	Mw	Efecto
24-11-1604	-18.500	-70.400	8.5		TD	10-11-1922	-28.500	-70.000	8.39		TM
16-09-1615	-18.500	-70.350	8.8		TM	19-10-1929	-23.000	-69.000	7.5		-
08-07-1730	-33.050	-71.630	8.7		TD	23-02-1933	-20.000	-71.000	7.6		-
30-03-1796	-27.350	-70.350	7.7		-	06-04-1943	-30.750	-72.000	8.3		T
11-04-1819	-27.350	-70.350	8.3		TD	02-08-1946	-26.500	-70.500	7.9		-
19-11-1822	-33.050	-71.630	8.5		TM	09-12-1950	-23.500	-67.500	8.3		-
08-10-1831	-18.500	-71.000	7.8		-	08-02-1954	-29.000	-70.500	7.7		-
18-09-1833	-18.500	-70.400	7.7		-	13-06-1959	-20.420	-69.000	7.5		-
17-12-1849	-29.950	-71.350	7.5		TM	28-12-1966	-25.510	-70.740	7.8		-
05-10-1859	-27.350	-70.350	7.6		TM	21-12-1967	-21.800	-70.000	7.5		-
13-08-1868	-18.500	-70.350	8.5		TD	08-07-1971	-32.511	-71.207	7.5		TM
24-08-1869	-19.600	-70.230	7.5		TM	16-10-1981	-33.134	-73.074	7.5		-
09-05-1877	-19.600	-70.230	8.5		TD	03-03-1985	-33.240	-71.850	7.8		T
23-01-1878	-20.000	-70.300	7.9		-	13-06-2005	-19.895	-69.125	7.8		-
15-08-1880	-31.620	-71.180	7.7		-	14-11-2007	-22.314	-70.078	7.5		-
16-08-1906	-33.000	-72.000	7.9		TM	01-04-2014	-19.572	-70.908	8,2 Mw		T
08-06-1909	-26.500	-70.500	7.6		-	03-04-2014	-20.571	-70.493	7,7 Mw		-
20-05-1918	-28.500	-71.500	7.9		-	16-09-2014	-31.573	-71.674	8,3 Mw		TD
04-12-1918	-26.000	-71.000	8.2		TM						

T	Tsunami
TM	Tsunami moderado
TD	Tsunami destructor y mayor
-	Sin información

De la Tabla 1 se puede inferir que desde el año 1570 a la fecha, en el norte de Chile se han registrado 37 sismos con una magnitud mayor a 7,5 Mw, de los cuales se cuenta con 18 registros que han generado un tsunami en las costas de Chile.

Debido a lo anterior, se cuenta con antecedentes para evaluar un posible tsunami en el norte de Chile. Sin embargo este estudio se centra en la ciudad de Coquimbo, puesto que este lugar presenta una brecha sísmica, es decir, se espera que a futuro en esta zona se libere energía que produzca algún sismo de consideraciones importantes, y que este genere un tsunami que afecte a las costas de la ciudad de Coquimbo.

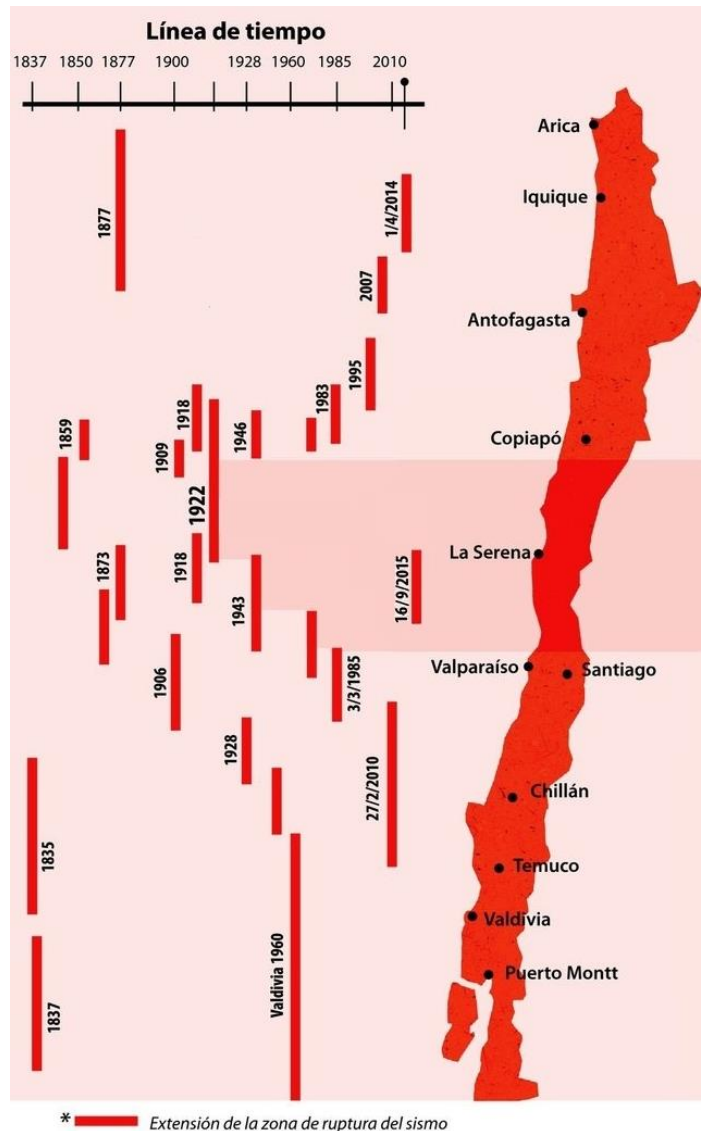


Figura 1: Línea de tiempo de sismos en Chile.
Fuente: (Cisternas, 2014)(Modificado)

Es cierto que los terremotos no se pueden predecir, pero hay una manera sencilla de saber más o menos donde se espera que ocurra uno. El mapa presentado en la Figura 1 muestra en una línea de tiempo los sismos que han ocurrido en la historia reciente entre el sur de Perú y la Décima Región de Chile, siendo cada sismo representó con una línea vertical que muestra la extensión de la zona que afectó.

Si se observa el mapa se puede apreciar que desde el sur de Copiapó hasta Valparaíso el silencio sísmico o la brecha sísmica es preocupante. También en el mapa se puede ver la brecha sísmica que presenta la ciudad de Valdivia, pero a modo de acotar este estudio, es que sólo se realizará en la ciudad de Coquimbo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Realizar una predicción de daños en estructuras ubicadas en la ciudad de Coquimbo utilizando las características hidrodinámicas de un tsunami simulado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Mejorar la resolución de la topo-batimetría.
- Proponer distintos escenarios para la ciudad de Coquimbo.
- Generar mapas de daño estructural para los escenarios propuestos.

1.3 Caracterización de la zona de estudio

La ciudad de Coquimbo está ubicada sobre una península en la cuarta región al norte de Chile, es una ciudad puerto y la capital de la provincia del Elqui (Región de Coquimbo). Se caracteriza por sus extensas playas y bahías de arenas suaves, clima soleado y agua templadas.

La comuna de Coquimbo fue fundada el 5 de mayo de 1867, cuenta con una superficie de 1.429 km² y una población de 202.287 habitantes (INE, 2012). En la Figura 2 se puede apreciar geográficamente la ubicación de la zona de estudio.

La ciudad además de ser conocida por sus 56 kilómetros de playas, cuenta con una de las principales empresas pesqueras de la región y el comercio marítimo posee una fuerte presencia debido a la existencia del Puerto de Coquimbo, lugar de atraque de naves mercantes y cruceros turísticos, convirtiéndose en el principal puerto exportador para los productos originarios de la Región de Coquimbo.

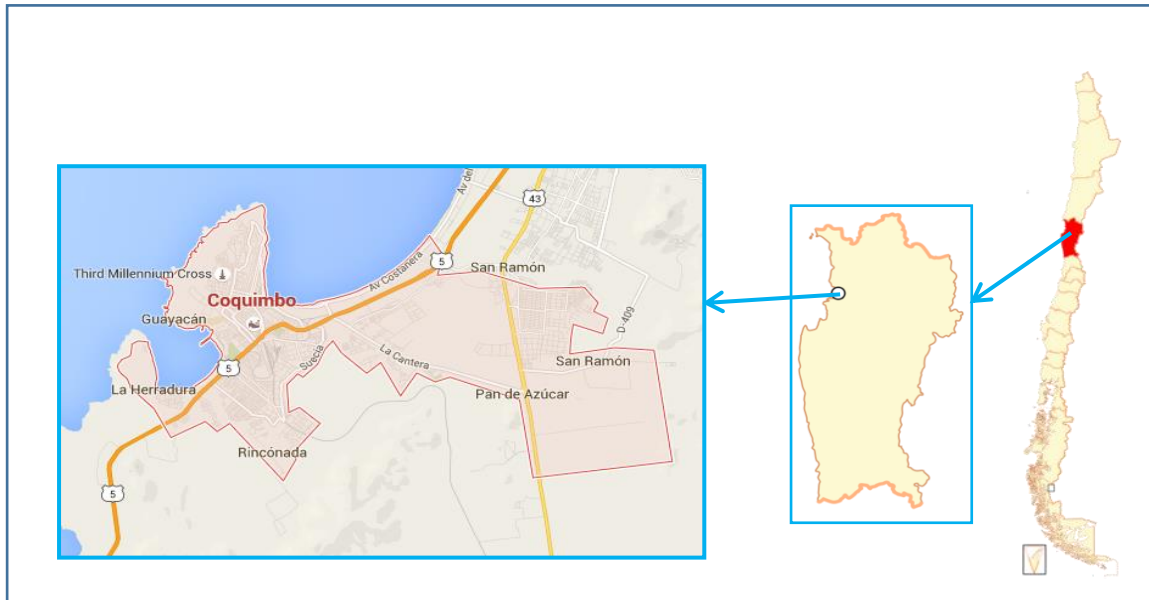


Figura 2: Localización de la zona de estudio, Coquimbo, IV Región, Chile.
Fuente: (Google, 2015)

Gracias a la bahía existente, el puerto se encuentra protegido del oleaje. El 16 de septiembre del 2015 Coquimbo se vio afectado por un sismo que alcanzó una magnitud de 8.4 en la escala de Richter, generando además tsunamis que arrasaron con las costas de la ciudad. Las amplitudes máximas del tsunami registradas por las estaciones de nivel del mar del SHOA fueron de 4,5 m en Coquimbo, el puerto pesquero artesanal fue completamente inundado. El sector Baquedado, que se encuentra ubicado detrás de un humedal también fue completamente inundado perdiendo varias personas en el lugar (Soychile.cl, 2015). El edificio de la Teletón fue uno de los más afectados por la inundación. La Figura 3 muestra el antes y el después del tsunami del 2015.



Figura 3: Coquimbo antes y después del tsunami ocurrido el 16 de septiembre del 2015.
Fuente: (Soychile.cl, 2015)

Chile se ubica en el cinturón de fuego del Pacífico, o también conocido como cinturón cicumpacífico, éste anillo de fuego está situado en las costas del océano Pacífico, se extiende sobre 40.000 km con una forma de herradura y se caracteriza por concentrar algunas de las zonas de subducción más importantes del mundo, lo que ocasiona una intensa actividad sísmica y volcánica en las zonas que abarca. Según la teoría de las placas tectónicas, Chile se ubica sobre la placa Sudamericana (Figura 4), región que es subductada por la placa de Nazca produciendo un desplazamiento de placas de aproximadamente 7 cm/año. Es por lo anterior que en Chile, y especialmente en Coquimbo, se producen habitualmente terremotos de gran magnitud causando la generación de tsunamis de gran intensidad.

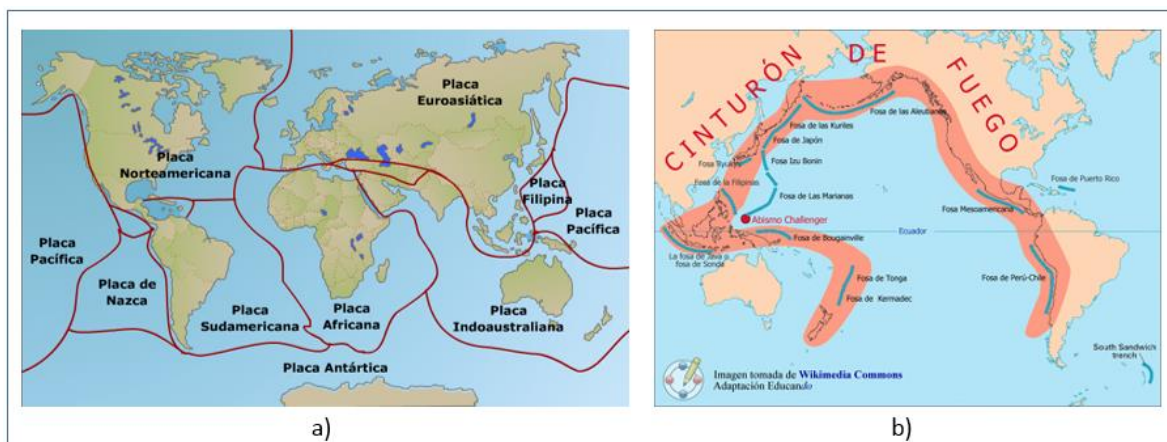


Figura 4: a) Placas Tectónicas, b) Cinturón de Fuego del Pacífico.
 Fuente: (Plataforma educativa aragonesa, 2016)

Por último, diferenciando las zonas de mayor riesgo y la vulnerabilidad estructural de una localidad, es posible implementar mejoras estructurales, y en un futuro regular el tipo de edificaciones que se pretendan construir en una zona de alto riesgo. Esto podría ayudar a mitigar la destrucción causada por un Tsunami y disminuir el tiempo de reconstrucción del sector afectado por la inundación.

2. Marco Teórico

2.1 Mecánica de Ondas

En el mar las fuerzas generadoras de ondas más importantes son debidas al viento; sin embargo existen ondas progresivas llamadas tsunamis que son generadas por un movimiento de las masas de agua. A continuación se describen ciertos parámetros que ayudan a caracterizar las ondas que se propagan por el océano.

2.1.1 Parámetros de caracterización de las ondas de tsunami

- Periodo de la onda (T)
 El periodo se define como el tiempo que transcurre en que las crestas de dos olas consecutivas pasen por un punto fijo.

- Longitud de la onda (L)
Distancia horizontal entre dos puntos idénticos consecutivos dentro de la onda.
- Amplitud de la onda (A)
Diferencia entre el valor de la cresta o valle de una onda y el nivel de referencia.
- Profundidad (h)
Distancia entre el fondo y el nivel de referencia.
- Celeridad o velocidad de fase (C)
Velocidad a la cual se propaga la onda en el medio. Puede ser obtenida como el cociente entre la longitud de onda y el periodo.
- Ondas progresivas
Ondas que tienen una variación temporal y espacial, es decir oscilan de forma vertical y horizontal, representando así la propagación de la onda a una velocidad C constante.

En la Figura 5 se esquematizan algunos de los parámetros descritos anteriormente.

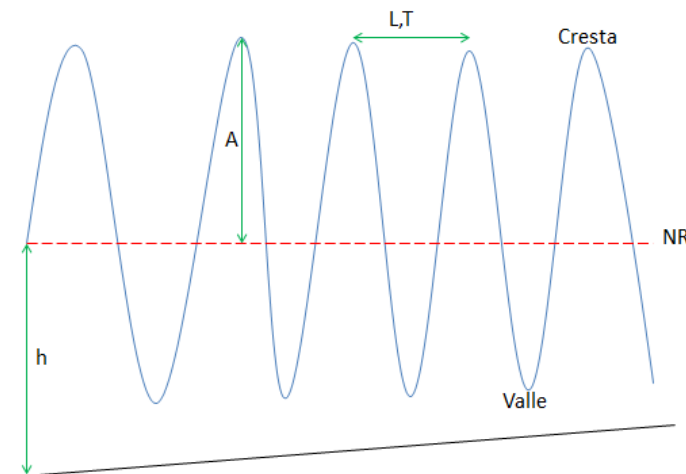


Figura 5: Esquema de los parámetros de caracterización de las ondas.
Fuente: Elaboración propia.

2.2 Tsunamis

2.2.1 Generación de los terremotos

La actividad volcánica o el movimiento de las placas tectónicas es lo que genera los terremotos o sismos (Figura 4), existen dos escalas utilizadas para medir un sismo, la escala de Richter y Mercalli, la primera representa la magnitud de la energía liberada y la segunda la intensidad del daño producido y la sensación percibida por la gente.

Se llama hipocentro al sitio al interior de la Tierra donde se origina un sismo y epicentro al lugar en la superficie ubicado en la vertical que nace del hipocentro (Figura 6).

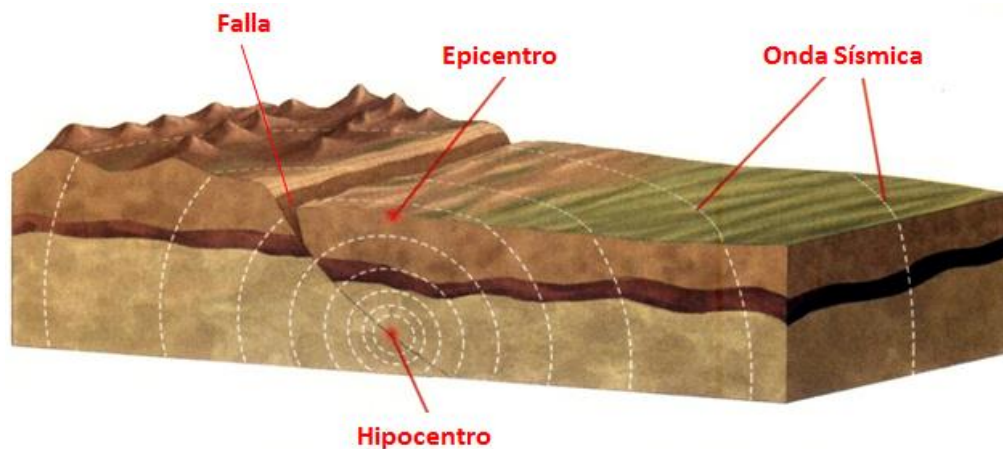


Figura 6: Esquema de un sismo
Fuente: (Toro, 2014)

Como se mencionó en el apartado 1.3, Chile se ubica en la placa Sudamericana que se mueve hacia el oeste, y que choca con la placa de Nazca, produciendo una zona de subducción (Figura 7). La plaza de Nazca avanza a una velocidad de aproximadamente 70 mm por año.

En Chile, el origen de la mayoría de los grandes terremotos obedece al movimiento de las placas tectónicas. El deslizamiento de una placa bajo la otra no ocurre de forma continua, si no que se producen atascamientos donde comienza a acumularse una gran cantidad de energía. Cuando el movimiento se reinicia se produce de forma brusca y esto genera el movimiento sísmico.



Figura 7: Zona de subducción.
Fuente: (Toro, 2014)

2.2.2 Generación de los tsunamis

Los tsunamis se caracterizan por ser ondas de periodo y longitud largos, se originan como resultado de la perturbación de una masa de agua que generalmente es a causa de un sismo, pero también se pueden producir por erupciones de volcanes submarinos, el impacto de un meteorito, por explosiones en la superficie del mar o deslizamientos de terrenos.

La Figura 8 muestra un esquema de como la placa de Nazca desciende bajo la placa Sudamericana (Figura 8a), generando una tensión que acumula energía. Esta energía una vez liberada de forma brusca es transmitida a la superficie del océano provocando lo que conocemos como la condición inicial de un tsunami (Figura 8b), y por último muestra como se programa el tsunami.

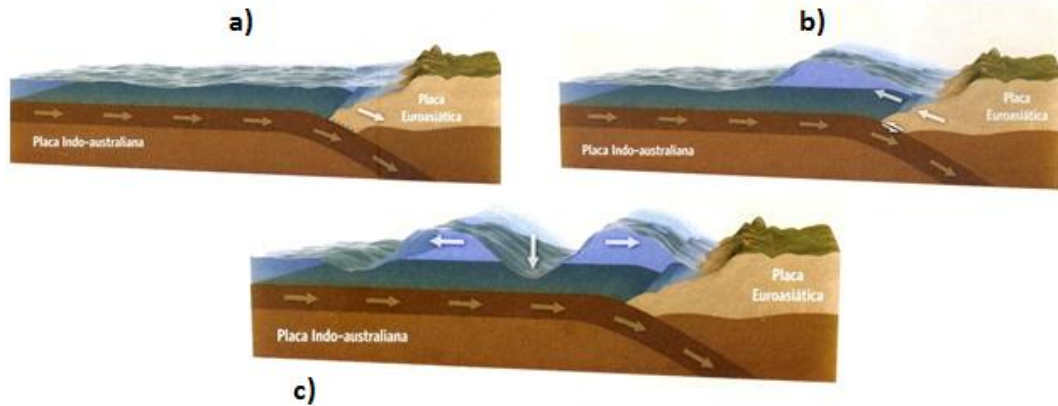


Figura 8: a) Esquema de falla de subducción y deformación de la placa continental, b) Generación de la condición inicial del tsunami, c) Propagación del tsunami
Fuente: (Toro, 2014)

2.2.3 Física de tsunami

A continuación se describen ciertos términos que son necesarios para obtener una adecuada modelación de un tsunami; en primer lugar se presenta el momento sísmico, el cual está definido por:

$$M_0 = \mu * D * A \quad (1)$$

Donde μ corresponde a la magnitud del módulo de corte de la corteza terrestre, D al deslizamiento medio sobre la superficie de ruptura A.

El momento sísmico se puede relacionar con la magnitud del terremoto mediante la siguiente expresión (Levin & Nosov, 2009):

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 6,07 \quad (2)$$

La superficie de ruptura (A), también llamada zona de ruptura suele aproximarse a un rectángulo de dimensiones L y W. Estas dimensiones pueden ser obtenidas a través de las leyes de escalamientos.

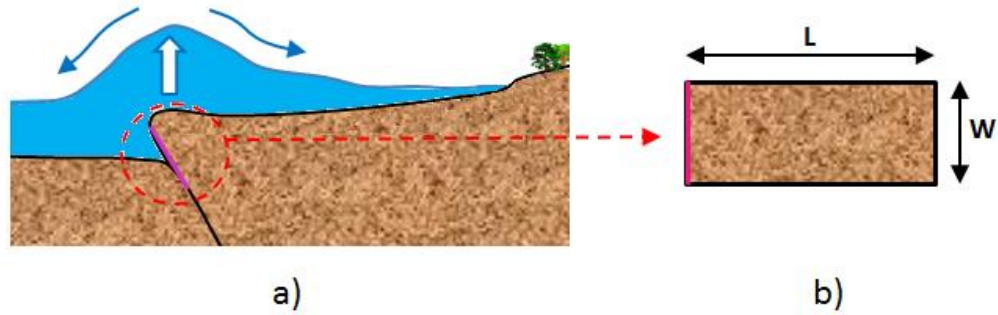


Figura 9: a) Deformación de la superficie de falla, b) Aproximación a un rectángulo de dimensiones L (largo) y W (ancho).

Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación de “L” se utilizará la relación empírica propuesta por Papazacho et al. (2004), mientras que para la determinación de “W” se escogerá la relación de Haiyun & Xiixin (2003), esto porque según estudios serían las relaciones que mejor se ajustan a los terremotos ocurridos en Chile sobre los 7,5 Mw (Aránguiz, 2014) (Figura 10).

$$\text{Log}(L) = 0,55Mw - 2,19 \quad (3) \quad (\text{Papazachos et al, 2004})$$

$$\text{Log}(Wm) = 0,5Mw - 2,3 \quad (4) \quad (\text{Haiyun \& Xiixin, 2003})$$

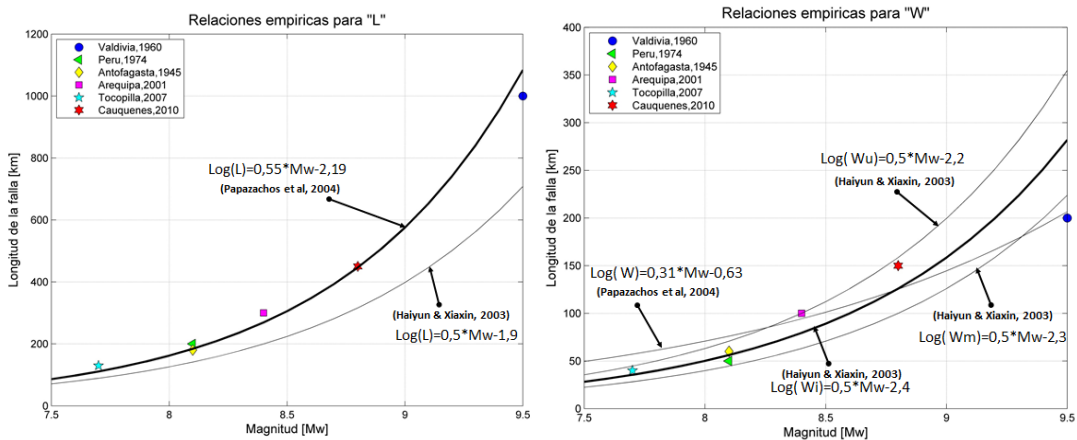


Figura 10: Grafica L y W, formulaciones de Papazachos y Haiyun & Xiixin en comparación con los planos de fallas producidos en Chile.

Fuente: Elaboración propia.

Para una correcta generación de la condición inicial se requiere de ciertos parámetros que definen la falla. Estos parámetros son presentados en la Tabla 2 y serán explicados utilizando la formulación de Okada (Figura 11)

2.2.4 Formulación de Okada

Okada en 1985 propone una solución analítica para la deformación que se produce en el mar, es importante mencionar que se asume que la deformación inicial de la superficie libre del mar es igual a la deformación del lecho marino.

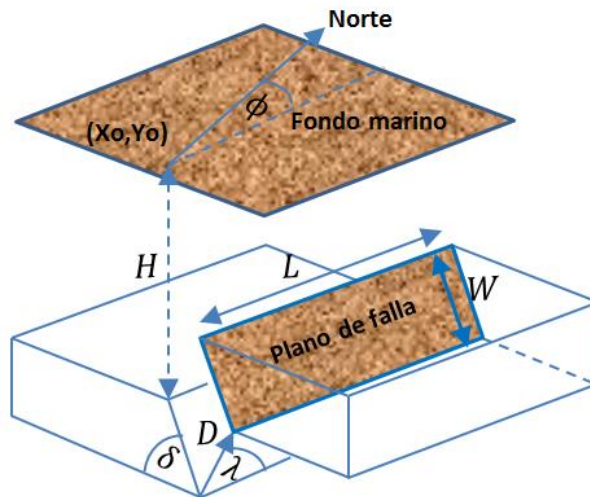


Figura 11: Esquema de la formulación de Okada.
Fuente: (Yamazaki et al, 2011)

Tabla 2: Parámetros de la formulación de Okada.

Símbolo	Parámetro
L	Longitud de la zona de ruptura
W	Ancho de la zona de ruptura.
θ	Rumbo en dirección del eje de la falla medido desde el norte en sentido horario.
δ	Ángulo de desplazamiento
λ	Ángulo de buzamiento
H	Profundidad focal
D	Desplazamiento de las placas.

2.2.5 Propagación del tsunami

La disipación de energía durante la propagación de un tsunami es mínima debido a que los tsunamis tienen grandes periodos y longitudes, es importante además mencionar que los tsunamis se comportan como un oleaje de aguas someras debido a que la profundidad es muy inferior a la longitud de onda de un tsunami.

La propagación del tsunami se puede separar en tres fases, la primera fase corresponde a cuando se produce la deformación del fondo marino debido a un evento sísmico, y como esta energía es transmitida a la masa de agua. La segunda fase es cuando el tsunami comienza a propagarse; es en esta parte donde la propagación se puede aproximar a la teoría lineal de oleaje en aguas someras, y debido a que los efectos de dispersión pueden ser considerado despreciables se puede utilizar las ecuaciones no lineales de aguas someras para la modelación matemática, es decir, cuando la longitud de onda (L) es al menos 20 veces mayor que la profundidad de agua (h).

$$\frac{h}{L} < \frac{1}{20} \quad (10)$$

Lo anterior suele ser válido para profundidades de entre los 50 y 100 m. La última fase se produce cuando la profundidad del fondo marino induce el acortamiento de la longitud de onda, lo que se traduce, en una amplificación de la altura del tsunami, provocando la inundación en los sectores costeros.

La velocidad de propagación del tsunami depende únicamente de la profundidad oceánica y puede ser calculada como:

$$c \leq \sqrt{g * h} \quad (11)$$

Donde c es la celeridad, g es la aceleración de gravedad y h corresponde a la profundidad media del fondo marino.

2.2.6 Variables Importantes

Es importante mencionar que el tsunami puede estar expuesto a ciertos fenómenos que pueden aumentar o disminuir la energía con que este se propaga. Por lo tanto se espera que el tsunami sufra transformaciones a medida que se propaga hacia aguas someras.

A continuación se realiza una breve descripción de los fenómenos que afectan al tsunami y al oleaje en general.

- Refracción

La refracción es el giro del frente de olas, este giro se produce porque si el frente de olas incide de forma oblicua a la costa o se encuentra con algún obstáculo, comenzará a sufrir un freno en el tren de olas, produciendo un pequeño giro. El frente tiende a ser perpendicular a la batimetría (Figura 12).



Figura 12: Esquema del efecto de la refracción sobre un oleaje.

Fuente: Elaboración propia

- Difracción

La difracción se produce cuando el frente de olas se encuentra con algún obstáculo (islas, cabos, rompeolas, arrecifes, etc.), produciendo una pérdida de energía que puede provocar cambios en la altura de las olas. También es debido a este fenómeno que existe presencia de oleaje en zonas de sombra, es decir, en zonas donde no índice el frente de oleaje directamente. En la Figura 13 se esquematiza la difracción de un oleaje sobre una zona protegida por un dique.

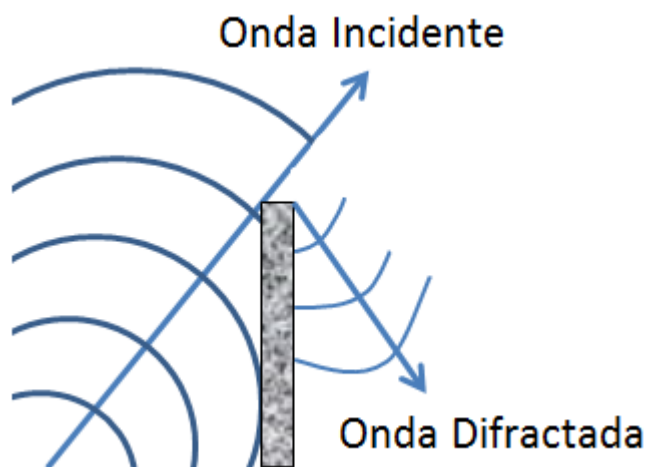


Figura 13: Difracción del oleaje en una zona protegida por un dique.
Fuente: Elaboración propia.

- Reflexión

La reflexión es el fenómeno que se produce cuando una onda, llamada onda incidente, se encuentra con un obstáculo provocando que parte de esa onda se propague alejándose de la costa, la onda que se propaga es llamada onda reflejada, la otra parte de la onda es transformada en energía que es transmitida al obstáculo, y que algunas ocasiones este obstáculo puede generar otra onda, que es llamada onda transmitida. A modo de esquema se presenta la Figura 14.

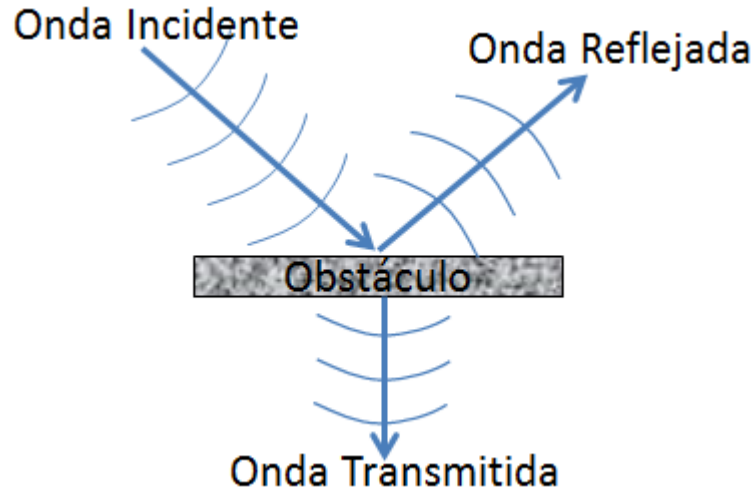


Figura 14: Reflexión del oleaje.
Fuente: Elaboración propia.

- Asomeramiento

El asomeramiento puede ser considerado como uno de los fenómenos más importantes que afectan a un tsunami, esto es debido a que cuando las olas entran en aguas someras disminuyen su velocidad, pero esta disminución es compensada con el aumento de la altura de las ondas, provocando entonces mayores inundaciones en los sectores costeros.

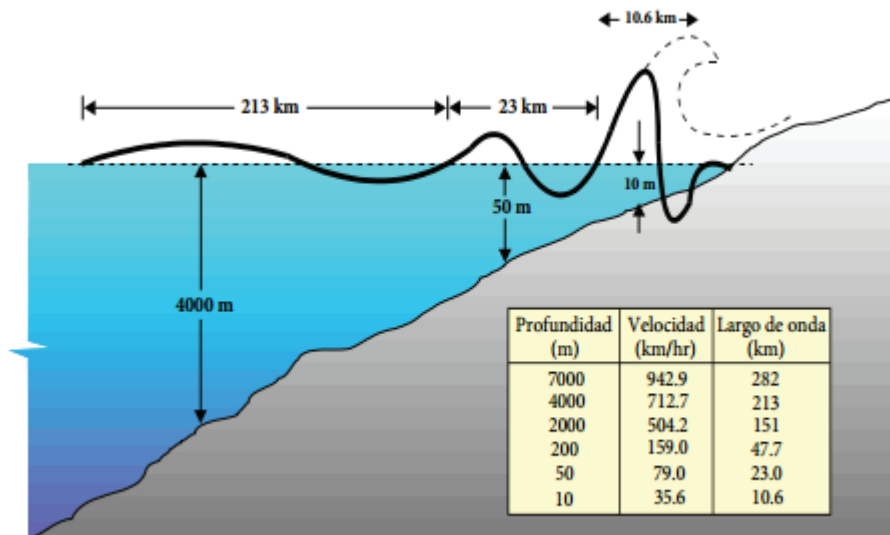


Figura 15: Esquema del efecto de asomeramiento en tsunamis.
Fuente: (SHOA, 2012)

Los fenómenos descritos anteriormente dependen de la batimetría del sector, por lo tanto la batimetría es importante para obtener una buena simulación del tsunami. Las variaciones en la batimetría y la influencia de los fenómenos descritos anteriormente generan distintas definiciones de alturas que serán descritas a continuación.

2.2.7 Alturas de Inundación

La última fase del tsunami es la inundación causada, sin embargo la medida de la inundación dependerá del nivel de referencia que se esté utilizando, a continuación se describen las diferentes alturas relacionadas con un tsunami (Figura 16).

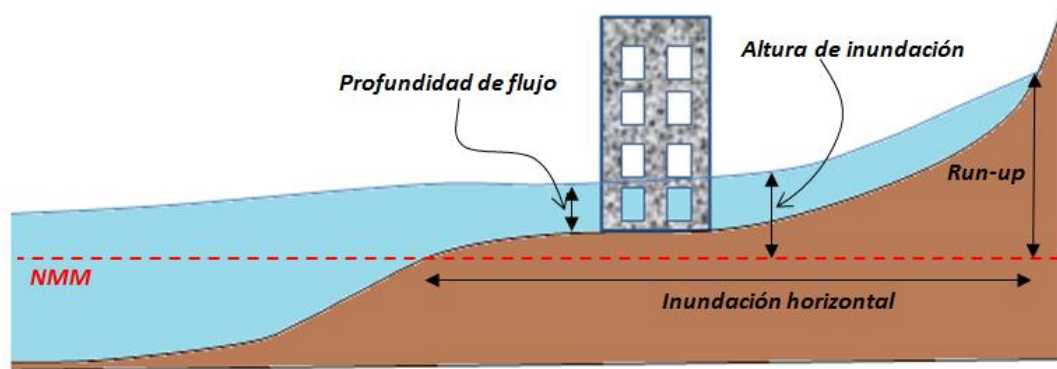


Figura 16: Esquema de las definiciones asociadas con la inundación
Fuente: Elaboración propia.

El primer término importante de considerar es la **altura de inundación**, que se puede describir como la elevación alcanzada por el agua del mar medida en relación con un datum dado como el nivel medio del agua o el nivel del agua en el momento de la llegada del tsunami. La altura de inundación es la suma de la profundidad de flujo y la altura topográfica. También se conoce como altura de tsunami.

Otro término importante y muy utilizado es el **Runup**, este término puede ser definido como la diferencia entre la elevación máxima de un tsunami y el nivel del mar. El runup solo se suele medir cuando se ve una clara inundación.

Como ya fue descrito todo lo relevante para poder obtener la condición inicial del tsunami, y efectuar una apropiada simulación y propagación, a continuación se describe el modelo numérico utilizado en el presente informe.

2.3 Modelo Numérico

2.3.1 Definición del modelo numérico

Debido a la alta complejidad de la propagación de los tsunamis no es posible obtener soluciones analíticas con suficiente detalle para caracterizar los parámetros de inundación, es por esto que se suele utilizar la modelación numérica, lográndose obtener una propagación espacio-temporal (Urrea & Aránguiz, 2015).

Estas modelaciones se suelen basar en las ecuaciones de continuidad y en la segunda ley de Newton, de las que se derivan las ecuaciones de Navier-Stokes. Sin embargo la viscosidad se suele despreciar y el tsunami suele ser considerado como no dispersivo, por lo tanto se termina utilizando las Ecuaciones No Lineales de Aguas Someras.

Si se considera que la presión es hidrostática y que la velocidad es uniforme es posible definir las siguientes ecuaciones (Urrea & Aránguiz, 2015):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \right\} = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{M^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{MN}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + S_x = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{MN}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{N^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + S_y = 0 \quad (14)$$

Donde M y N representan los flujos volumétricos integrados en la vertical.

$$M = u * (h + \eta) \quad (15)$$

$$N = v * (h + \eta) \quad (16)$$

Donde:

η Representa el desplazamiento de la superficie libre respecto a un nivel de referencia.

v, u Son las componentes horizontales del vector de velocidad, en las direcciones x e y respectivamente.

g Es la aceleración de gravedad

H Es la profundidad total del agua que puede ser obtenida con la siguiente expresión:

$$H = h + \eta \quad (17)$$

Siendo h la profundidad estática.

Un fenómeno físico importante es la disipación que se produce por la fricción, esta fricción puede ser calculada utilizando las siguientes formulaciones:

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} M(M^2 + N^2)^{1/2} \quad (18)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} N(M^2 + N^2)^{1/2} \quad (19)$$

Donde n representa el coeficiente de fricción de Manning

Algunos modelos numéricos utilizados en Chile son TUNAMI, COMCOT, NEOWAVE y MIKE21, sin embargo se debe tener en consideración que el resultado de un modelo numérico puede variar con respecto a otro.

Cada modelo numérico tiene un dominio de integración, este dominio corresponde a un conjunto de mallas anidadas, donde cada malla cuenta con resolución espacial diferente.

2.3.2 Duración de la simulación y tiempo de integración.

El SHOA recomienda que el tiempo mínimo de simulación debe ser de 6 horas (SHOA, 2012) cuando la fuente sísmica es de campo cercano, esto se debe principalmente a que la ola que provoca mayor inundación no siempre resulta ser la primera en la llegar a la costa, por lo tanto, una modelación de 6 horas de duración es suficiente para encontrar la máxima inundación que se podría producir para un evento puntual.

Cada grilla tiene un tiempo de integración diferente, este tiempo debe satisfacer la condición de estabilidad numérica y para ello será definido en función de la condición de Courant-Friedrichs-Levy que se describe a continuación.

$$\frac{\Delta t \sqrt{gh_{max}}}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (20)$$

Dónde:

Δx : Espaciamiento de la grilla medido en metros.

Δt : Espaciamiento temporal medido en segundos.

h_{max} : Profundidad máxima en la grilla medida en metros.

g : Aceleración de gravedad medida en m/s^2 .

El valor de C_{max} depende del método usado para resolver las ecuaciones. En general la estabilidad teórica se alcanza con un valor $C_{max} < 1$, pero es recomendable valores de $C_{max} \approx 0,7$

2.3.3 Fuente Homogénea o Heterogénea de la zona de ruptura

Existen variados estudios donde la zona de ruptura de un sismo es tomada como un rectángulo con un desplazamiento uniforme, esto se considera como una fuente homogénea o PFM (Planar Fault Model), mientras que un modelo heterogéneo o FFM (Finite Fault Model) considera varios segmentos donde cada uno se desplaza distinto, el resultado de cada segmento se superpone para obtener un desplazamiento total (Figura 17 y 18).

Sin embargo, generar un modelo heterogéneo requiere de conocimientos geológicos más avanzados, por lo tanto en el siguiente estudio se utilizarán solo modelos homogéneos, teniendo en consideración que la utilización de fuentes homogéneas podría subestimar o sobreestimar la inundación.

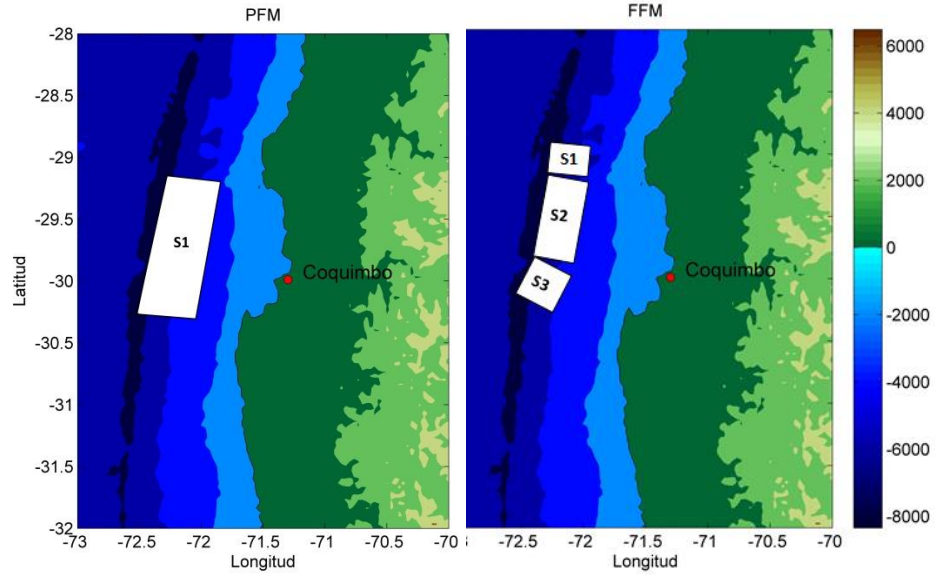


Figura 17: Izquierda: Modelo de ruptura rectangular de un segmento (PFM). Derecha: Modelo de ruptura de tres segmentos (FFM).
Fuente: Elaboración propia.

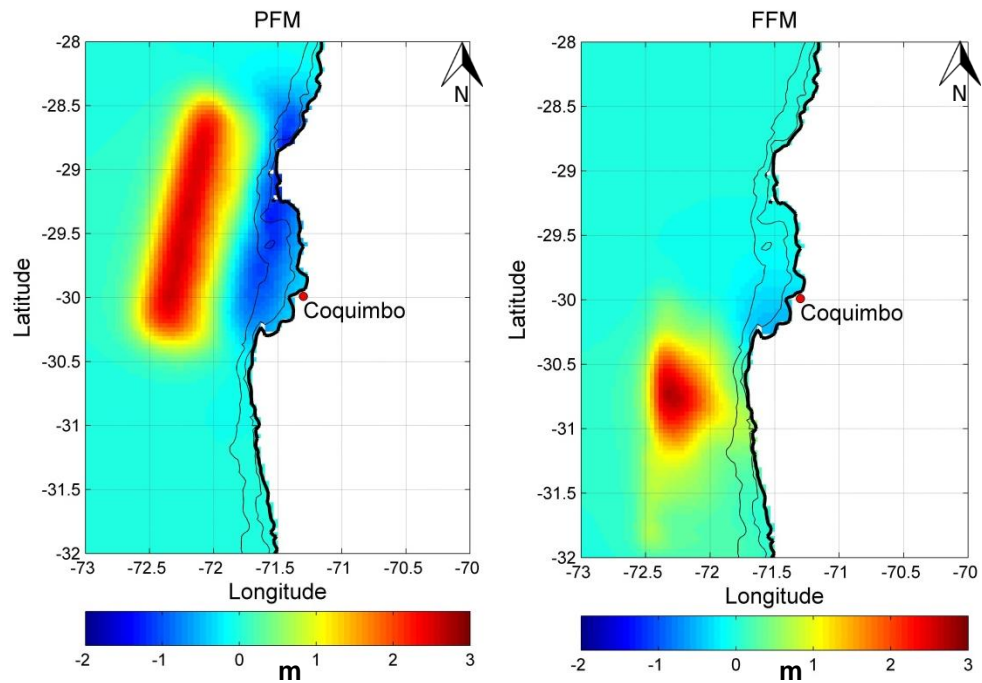


Figura 18: Condición inicial de un Tsunami considerando una fuente homogénea (Izquierda) y una fuente heterogénea (Derecha). Medidas en metros (m).
Fuente: Elaboración propia.

2.3.3 NEOWAVE

Yamazaki et al., 2009, creó un modelo no hidrostático de profundidad integrada llamado NEOWAVE por sus siglas en inglés (Non-hydrostatic Evolution of Ocean Waves). Este modelo se basa en las ecuaciones de aguas someras no lineales (Yamazaki, Kowalik, & Cheung, 2010).

Las ecuaciones de momento y continuidad son las que se describen a continuación:

Dirección x

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{11}{2} \frac{\partial q}{\rho \partial x} - \frac{1}{2} \frac{q}{D \rho} \frac{\partial}{\partial x} (\zeta - h) - n^2 \frac{g}{D^{\frac{1}{3}}} \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{\rho D} \quad (21)$$

Dirección y

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{11}{2} \frac{\partial q}{\rho \partial y} - \frac{1}{2} \frac{q}{D \rho} \frac{\partial}{\partial y} (\zeta - h) - n^2 \frac{g}{D^{\frac{1}{3}}} \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{\rho D} \quad (22)$$

Dirección z

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{q}{\rho D} \quad (23)$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(UD)}{\partial x} + \frac{\partial(VD)}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

Donde

U, V y W: Componentes de la velocidad de profundidad promediada.

q: Presión no hidrostática de la parte inferior

n: coeficiente de rugosidad de Manning.

NEOWAVE puede utilizar hasta 5 mallas anidadas, que cuentan con diferente resolución espacial y abarcan diferentes áreas. La resolución espacial (Δx) y temporal (Δt) deben respetar un incremento de 1:6 para asegurar una menor inestabilidad en el modelo (Yamazaki et al., 2010).

2.3.4 Definición de las mallas y fuentes de información

Las mallas a utilizar, como ya se mencionó, serán mallas anidadas de diferente resolución espacial, la grilla de menor resolución debe ser la que abarca mayor área con el fin de que el origen del tsunami y la zona de ruptura estén completamente contenidos en ella. La grilla de mayor resolución debe contener la zona de estudio, y debe tener una dimensión suficiente para asegurar que incluya cualquier singularidad o estructura que se pueda presentar en la zona y que por lo tanto afecte a la propagación del tsunami.

A continuación se describen las diferentes fuentes de información que pueden ser utilizadas para generar mallas.

- **General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)**

GEBCO es una organización que proporciona batimetría de todos los océanos, con una resolución máxima de 30 segundos de arco (926 m) referidas al nivel medio del mar (NMM).

- **Carta Náutica (CN)**

Carta Náutica o carta de navegación, es la representación a escala de superficies marítimas, donde se indican las profundidades del mar y detalles de la costa para ayudar a la navegación. Las cartas náuticas suelen estar referidas al Nivel de Reducción de Sonda (NRS). En Chile la actualización de las cartas náuticas es responsabilidad del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA).

- **Planos del Borde Costero (PBC)**

Planos del Borde Costero, son mapas que cubren zonas costeras y cuentan con información topográfica hasta al cota +300 [m] sobre el NMM aproximadamente. Estos planos se suelen complementar con información topobatemétrica de la zona de estudio.

- **Topografía y batimetría de detalle.**

Un estudio batimétrico o topográfico por lo general es llevado a cabo cuando las fuentes de información descritas anteriormente no son suficientes para detallar la zona de estudio.

Se debe tener en cuenta que todas estas fuentes de información tienen diferentes referencias (NMM, NRS, etc), por lo tanto, el primer paso para confeccionar la grilla es unificar la referencia vertical y horizontal de cada una de ellas.

2.4 Mapas de inundación

La finalidad de obtener un mapa de inundación es identificar que sectores de la zona de estudio se verían más afectados, y evaluar que tan devastador puede ser el evento que se está simulando. Como se señaló anteriormente la simulación se realiza en el software NEOWAVE utilizando mallas anidadas, a continuación se presenta un ejemplo de las mallas que se suelen utilizar (Figura 19).

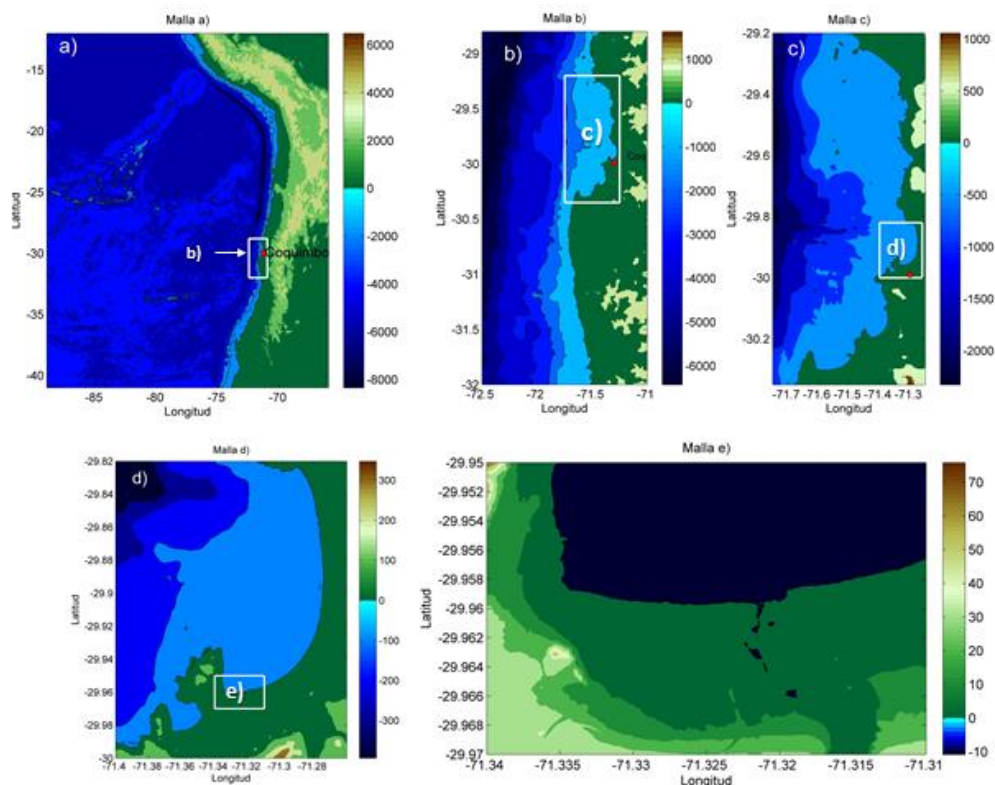


Figura 19: Ejemplo de mallas utilizadas en un modelo numérico.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez definida las mallas, se realiza la modelación numérica que entrega como resultado las profundidades (Figura 20) y la velocidades (Figura 21) alcanzadas por la inundación.

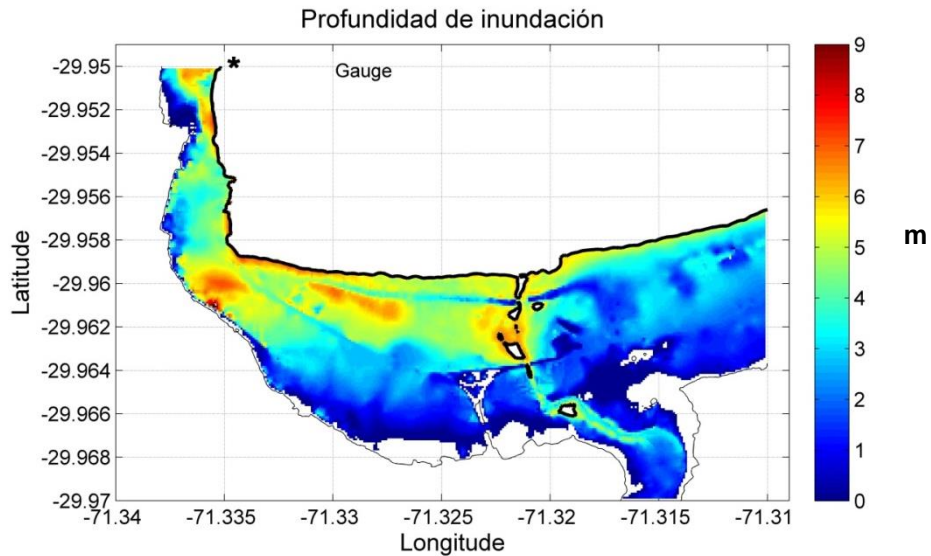


Figura 20: Ejemplo de profundidad de inundación, resultado obtenido de un modelo numérico.
Fuente: Elaboración propia.

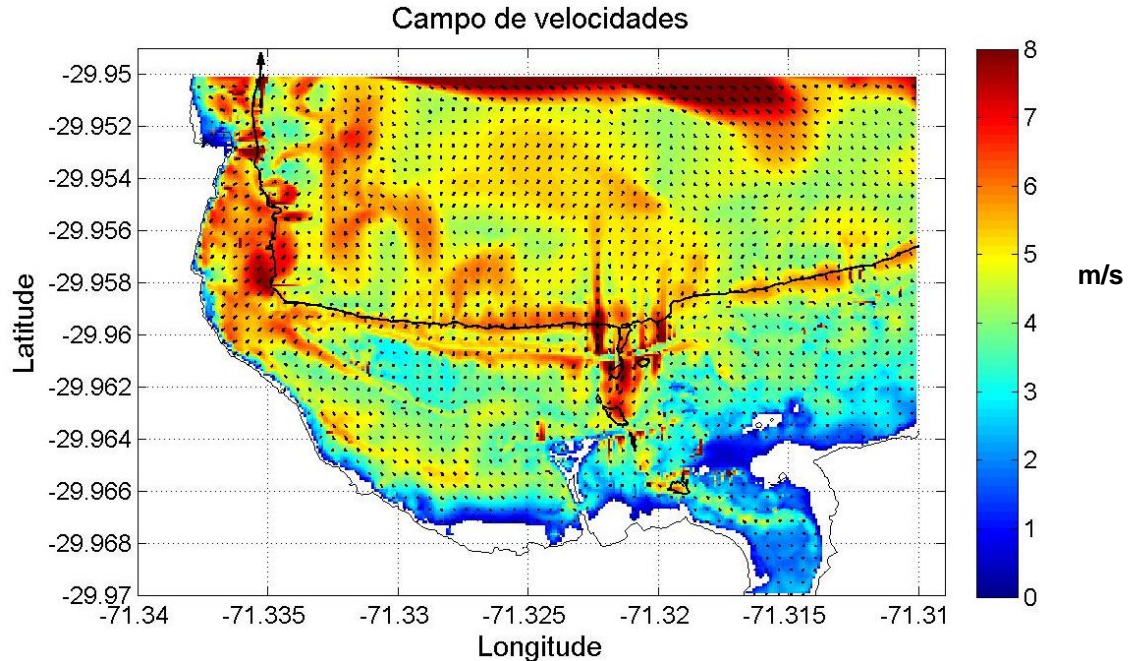


Figura 21: Ejemplo de velocidades de inundación obtenidas de los resultados de un modelo numérico.
Fuente: Elaboración propia.

Realizando una comparación de los eventos simulados, se espera determinar que evento podría ser más devastador para la zona de estudio, y además definir los sectores que se ven afectados. Teniendo lo anterior se puede realizar una estimación de daños para la localidad escogida.

2.5 Método de estimación de daños

El método mas actual para la estimación de daños es el propuesto por Koshimura et al. (2009) y por lo tanto es el método utilizado en el presente estudio.

2.5.1 Estimación de daño por Koshimura

Koshimura et al., (2009) propuso un método en el que se evalúa información obtenida por teledetección por satélite, estudios de campo, modelaciones numéricas y análisis de datos históricos. Este método plantea la utilización de curvas de fragilidad que son obtenidas a través de funciones de distribución de probabilidad de tipo Normal (27), o Log-Normal (28) (Koshimura et al., 2009).

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{x - \mu}{\sigma} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) dt \quad (27)$$

$$P_D(x) = \Phi \left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right] = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi t} \exp \left(-\frac{(\ln t - \lambda)^2}{2\xi^2} \right) dt \quad (28)$$

Donde $P_D(x)$ representa la probabilidad de daño estructural o la tasa de fatalidad, Φ representa a la función de distribución normal para la ecuación 27 y log-normal estandarizada para la ecuación 28, x (o $\ln(x)$) es la característica hidrodinámica del flujo de inundación, es decir, puede representar la profundidad de inundación, la velocidad del flujo o la fuerza hidrodinámica. μ (o λ , en el caso de la función log-normal) es la media de dicha característica y σ (o ξ) es la desviación estándar de la misma.

Koshimura plantea que las curvas de fragilidad pueden ser obtenidas mediante tres métodos:

- Teledetección por satélite y modelación numérica
- Teledetección por satélite y encuestas de campo.
- Con registros históricos.

2.5.2 Curvas de fragilidad

➤ Teledetección por satélite.

La teledetección por satélite consiste en el análisis de fotografías de alta resolución en las que es posible evaluar el techo de las edificación luego de ocurrido el tsunami.

Gokon et al (2010) propone los siguientes niveles de clasificación de daño para imágenes con buena resolución (Tabla 3).

Tabla 3: Niveles de daño propuestos por Gokon para el método de teledetección.
Fuente: (Gokon, Koshimura, & Matsuoka, 2010)

Clasificación	Criterio
Sobrevivió	No se observan cambios en la forma antes y después del tsunami.
Mayor	Es posible observar un pequeño cambio en el techo al comparar las imágenes pre y post tsunami.
Colapso	Se observa claramente que una gran parte del techo desapareció.
Arrasado	Sólo quedan las fundaciones de la estructura.



Figura 22: Clasificación de daños por teledetección según Gokon
Fuente: (Urra, 2015)

Cuando la resolución de las imágenes no es lo suficientemente buena para realizar la clasificación propuesta por Gokon (2010), se puede utilizar lo propuesto por Suppasri (2004), quien realiza la clasificación utilizando solo dos niveles (Figura 23):

- **Destruída:** Estructuras colapsadas en las que el techo ha desaparecido
- **Sobreviviente:** Estructuras sin daño o con daño leve.



Figura 23: Niveles de daño por teledetección según Suppasri.
Fuente: (Urra, 2015).

➤ **Trabajo o Encuestas de campo.**

Este método es el que permite registrar alturas de inundaciones y clasificar el daño en las estructuras con los niveles que se estime conveniente, pero a pesar de ser el método más completo no es fácil de implementar, ya que como requisito es necesario efectuar el trabajo de campo lo antes posible una vez ocurrido el tsunami y contar con suficiente capital humano para realizar las mediciones.

Diferentes autores definieron niveles para clasificar las estructuras mediante trabajo en terreno (Tabla 4 y 5).

Tabla 4: Clasificación de daño mediante inspección en terreno propuesta por Gokon.

Fuente: (Gokon et al., 2010)

Clasificación	Criterio
Sin daños	No presenta inundación
Inundación leve	Solo las ventanas sufrieron daños
Moderado	Las paredes presentan daño
Mayor	Se destruyó una pequeña parte de la edificación
Colapso	Se destruyó gran parte de la edificación
Arrasado	Solo quedan las fundaciones de la estructura
Desconocido	No es posible clasificar.

Tabla 5: Clasificación de daño mediante inspección en terreno propuesta por Murao.

Fuente: (Murao & Nakazato, 2010)

Clasificación	Criterio
Sin daño	No se observan daños
Daño moderado	No se observan daños estructurales (reusable)
Daño grave	Posee daños estructurales (Inutilizable)
Daño total	Daño estructural completo

Este último, además incorporó una clasificación estructural en la que considera el número de pisos, la combinación de materialidad más común y la utilización de la estructura (Tabla 6).

Tabla 6: Clasificación de materialidad por número de pisos y utilización

Fuente: (Mura0 & Nakazato, 2010)

Tipo	Edificaciones livianas	Edificaciones sólidas
Estructura (material)	Albañilería, bloque, madera	Hormigón armado, acero
Número de pisos	Uno o dos	Dos o mas
Utilización	Habitacional o comercial	Público, comercial, oficinas.

➤ **Modelación numérica**

La modelación numérica fue explicada anteriormente, sin embargo en este punto se menciona como son utilizados los resultados de la modelación numérica para realizar las curvas de fragilidad.

Como ya se mencionó, la modelación numérica entrega como resultado la profundidad de inundación y la velocidad. Para confeccionar las curvas de fragilidad se utilizan los valores máximos de los resultados, esto debido a que se espera que en algún momento las edificaciones se verán afectadas por estos valores máximos, y la finalidad siempre es evaluar el comportamiento de las estructuras en el peor de los escenarios.

Los pasos que usualmente se utilizan para desarrollar curvas de fragilidad son los presentados en la Figura 24, donde el paso 1, 2 y 3 representa la teledetección por satélite y la clasificación de daño “Destruída o Sobrevive”, el paso 4 muestra la obtención de un histograma que ha sido obtenido agrupando las inundaciones registradas en las estructuras, el paso 5 representa la probabilidad de daño que ha sido calculada para cada rango que se definió en el histograma, el paso 6 corresponde al ajuste por mínimos cuadrados realizados al cálculo de la probabilidad de daño. Y por último en el paso 7 se construye la curva utilizando la distribución que entrega un mejor ajuste.

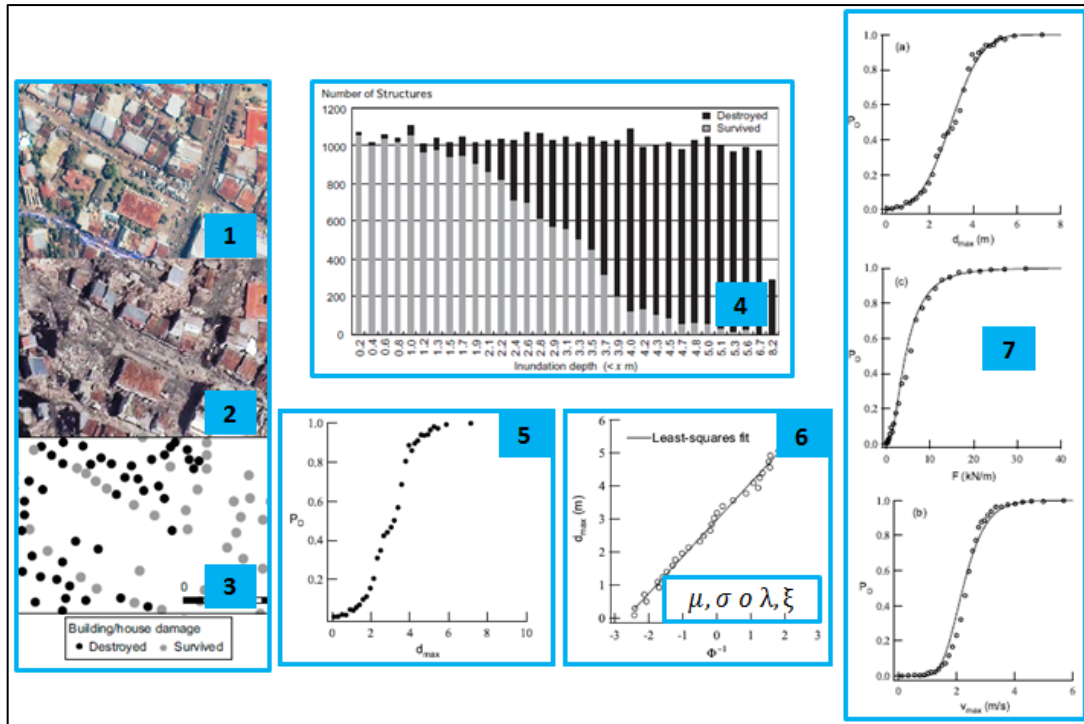


Figura 24: Pasos para la generación de curvas de fragilidad de daño, fuerza y velocidad.
Fuente: (Koshimura et al., 2009)

3. Materiales y Método

3.1 Mapas de inundación

3.1.1 Recopilación de la información topo-batimétrica y generación de mallas

Como se describió anteriormente la información topo-batimétrica es esencial para obtener una buena simulación de los eventos y por lo tanto un buen mapa de inundación. Además entre mejor sea la información topo-batimétrica de la zona de estudio, los resultados también serán más representativos.

Según lo descrito en el apartado 2.3.3, el modelo numérico NEOWAVE utiliza hasta 5 mallas anidadas, estas mallas deben estar perfectamente anidadas, es decir, el posicionamiento de una malla debe coincidir de manera exacta respecto a la otra, como se muestra en la Figura 25.

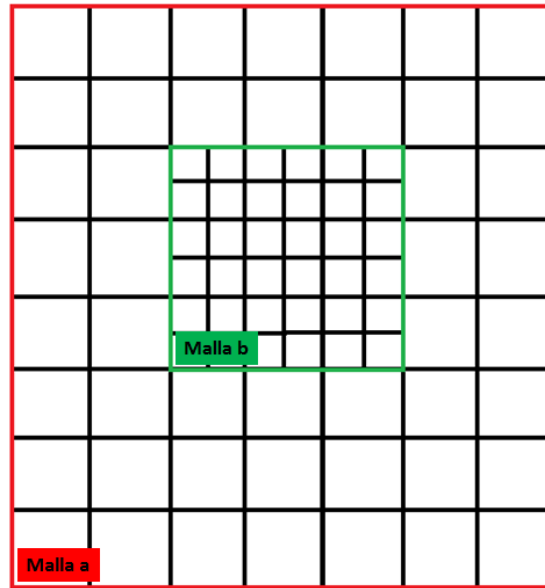


Figura 25: Ejemplo de mallas perfectamente anidadas
Fuente: elaboración propia.

Geográficamente las mallas utilizadas son las que se presentan en la Figura 26.



Figura 26: Ubicación de las cinco mallas a utilizar.
Fuente:(Google Earth, 2016), elaboración propia.

➤ Malla 1

La malla 1 (definida en color rojo en la Figura 26), tiene como principal fuente de información la base de datos GEBCO. Su punto de inicio (marcado con un punto rojo en la Figura 27a) corresponde a 271°E y -41°S, cuenta con una resolución de 120 segundos de longitud de arco, es decir, una resolución espacial de 3700 m. En la abscisa la malla tendrá 691 puntos mientras que en la coordenada tendrá 871 puntos.

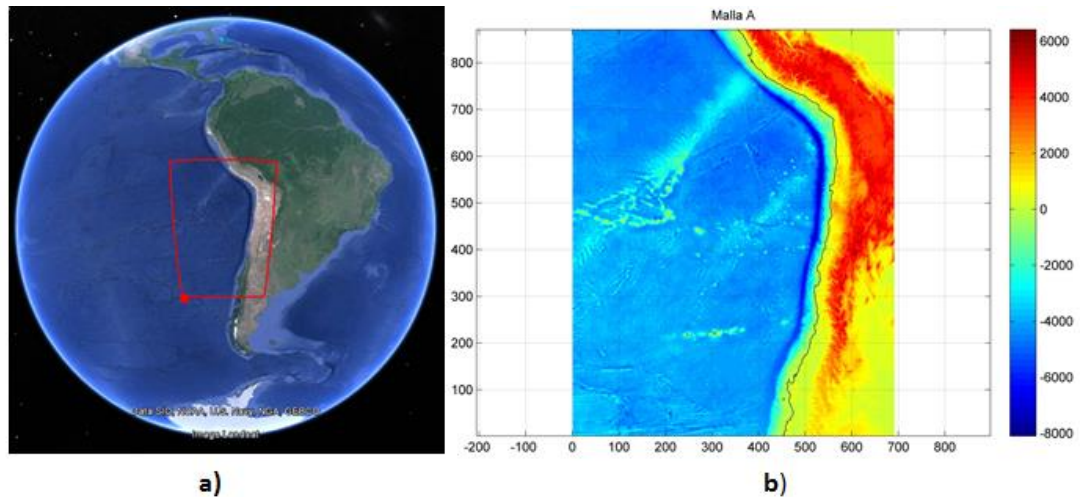


Figura 27: a) Ubicación geográfica de la malla 1, b) visualización de la malla 1.
Fuente: (Google Earth, 2016) y Matlab, elaboración propia.

➤ Malla 2

La malla 2 (definida en color rosa en la Figura 26), tiene como principal fuente de información la base de datos GEBCO (al igual que la malla 1). Su punto de inicio corresponde a 287.5°E y -32°S (marcado con un punto rojo en la Figura 28a), cuenta con una resolución de 30 segundos, lo que corresponde a 925 m de resolución espacial. En la abscisa la malla tendrá 181 puntos mientras que en la coordenada la malla tendrá 385 puntos.

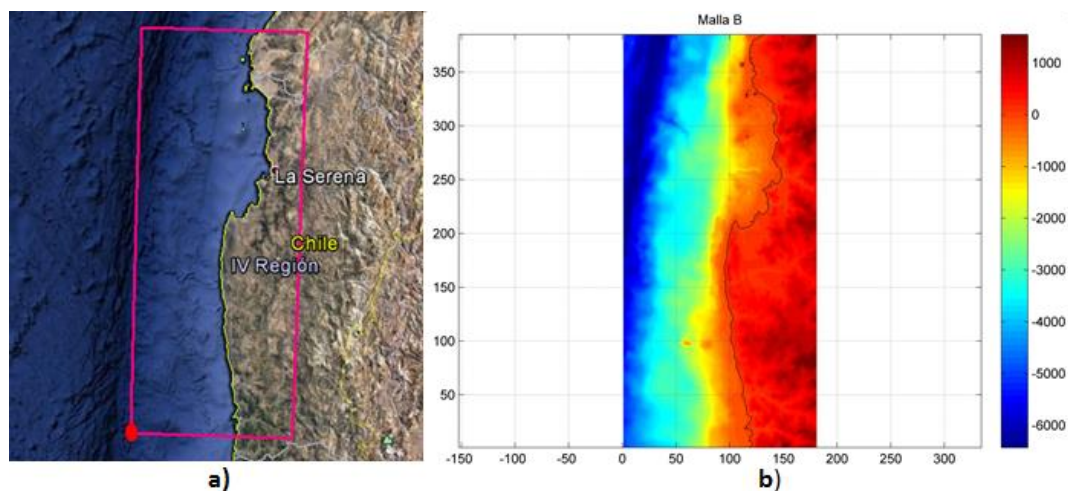


Figura 28: a) Ubicación geográfica de la malla 2, b) visualización de la malla 2.
Fuente: (Google Earth, 2016) y Matlab, elaboración propia.

➤ Malla 3

La malla 3 (definida en color verde en la Figura 26), tiene como fuentes de información la base de datos GEBCO y cartas náuticas obtenidas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Su punto de inicio corresponde a 288.25°E y -30.35°S (marcado con un punto rojo en la Figura 29a), cuenta con una resolución de 6 segundos, lo que corresponde a 185 m de resolución espacial. En la abscisa la malla tendrá 301 puntos mientras que en la coordenada la malla tendrá 691 puntos.

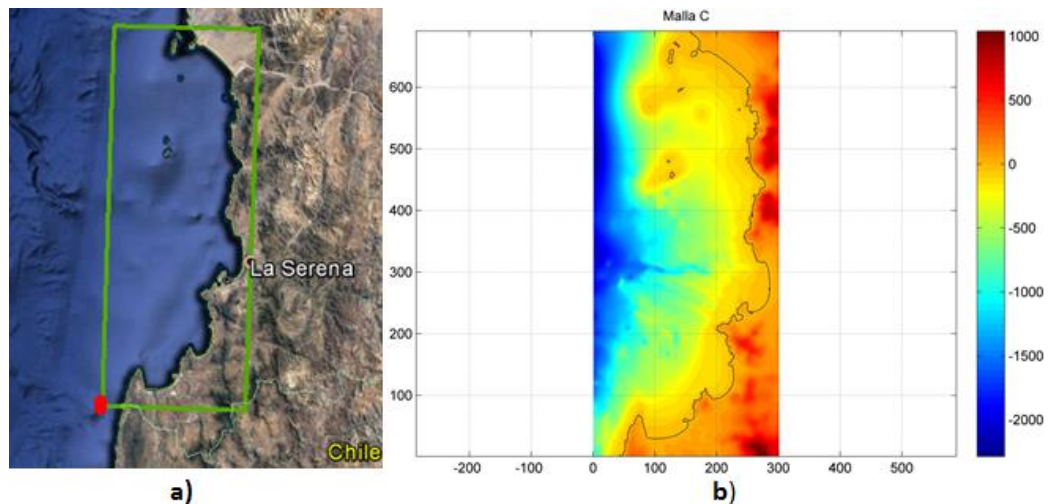


Figura 29: a) Ubicación geográfica de la malla 3, b) visualización de la malla 3.

Fuente: Google Earth y Matlab, elaboración propia.

➤ Malla 4

La malla 4 (definida en color blanco en la Figura 26), tiene como fuentes de información la base de datos GEBCO, cartas náuticas obtenidas del SHOA, topografías en detalle efectuadas en la zona de estudio y batimetrías aportadas por la Dirección de Obras Portuarias (DOP). Su punto de inicio corresponde a 288.6°E y -30°S (marcado con un punto rojo en la Figura 30a), cuenta con una resolución de 1 segundo, lo que equivale a 30.8 m de resolución espacial. En la abscisa la malla tendrá 505 puntos mientras que en la coordenada la malla tendrá 649 puntos.

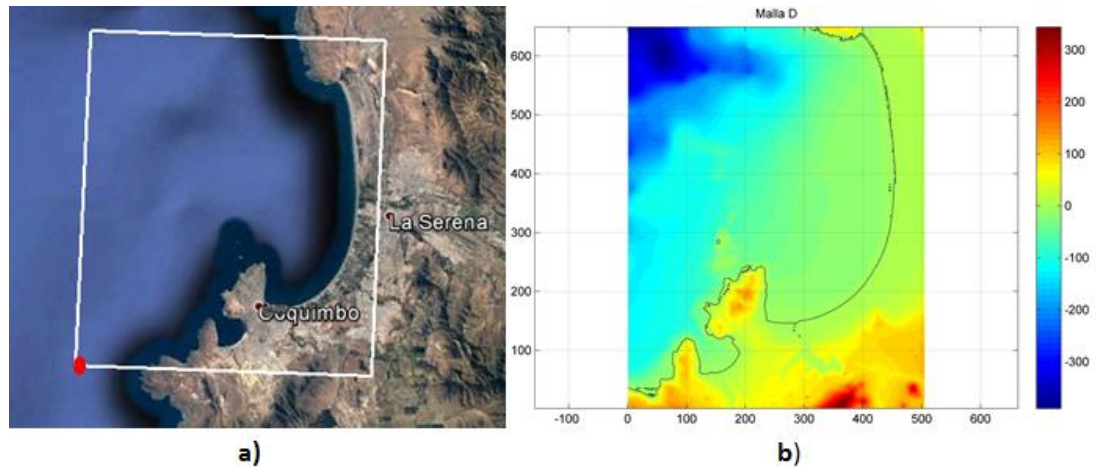


Figura 30: a) Ubicación geográfica de la malla 4, b) visualización de la malla 4.
Fuente: Google Earth y Matlab, elaboración propia.

➤ Malla 5

La malla 5 (definida en color naranja en la Figura 26) es la malla más importante, y la que debe contener la mejor información topo-batimétrica, ya que es la malla que se utilizará para evaluar la inundación en la zona de estudio. Como fuente de información tendrá cartas náuticas obtenidas del SHOA, batimetría aportada por el DOP y topografía en detalle efectuada en la zona de estudio. Se define el punto de inicio de la malla en 288.66°E y -29.97°S (marcado con un punto rojo en la Figura 31a), cuenta con una resolución de 0.3 segundos, lo que equivale a 10.3 m de resolución espacial. En la abscisa la malla tendrá 325 puntos mientras que en la coordenada la malla tendrá 217 puntos.

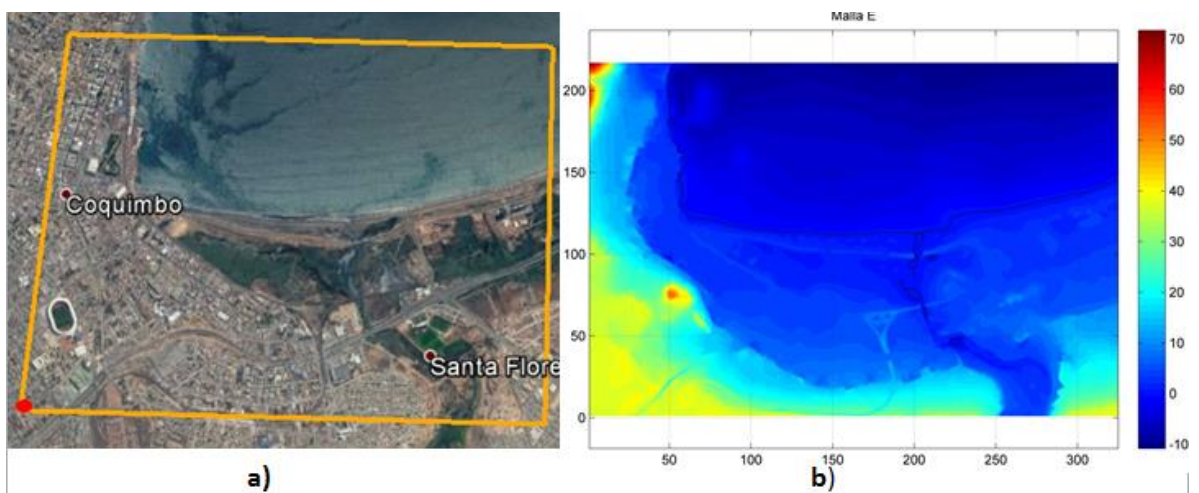


Figura 31: a) Ubicación geográfica de la malla 5, b) visualización de la malla 5.
Fuente: Google Earth y Matlab, elaboración propia.

Es importante mencionar que todas las fuentes de información fueron referidas a un mismo nivel, que en este caso corresponde al nivel medio del mar (NMM). Como resumen de las mallas utilizadas se presenta la Tabla 7, indicando el número de Courant (ecuación 20) utilizado en cada malla para asegurar la resolución de las ecuaciones del modelo numérico.

Tabla 7: Resumen de las mallas utilizadas en las simulaciones con NEOWAVE.
Fuente: Elaboración propia.

Malla	1 (malla a)	2 (malla b)	3 (malla c)	4 (malla d)	5 (malla e)
h_{max}	8000 m	6500 m	2300 m	390 m	10.8 m
C	280.14 m/s	252.52 m/s	159.71 m/s	61.862 m/s	10.31 m/s
Δ_x	3700 m	925 m	185 m	30.8 m	10.278 m
Δ_t	1 s	0.5 s	0.25 s	0.125 s	0.125 s
C_r	0.0757<1	0.1365<1	0.2158<1	0.2511<1	0.1254<1

3.1.2 Validación de las mallas

Para realizar la validación de las mallas generadas, se recurrió a los siguientes pasos

- 1.- Definir un evento sísmico que haya afectado a la zona de estudio en el pasado, y del cual se tenga información de mareógrafos y/o de alturas de inundación.
- 2.- Modelar el evento sísmico utilizando las cinco mallas generadas.
- 3.- Analizar los resultados entregados por la modelación numérica en NEOWAVE.
- 4.- Comparar los datos del mareógrafo durante el evento con los datos obtenidos del mareógrafo virtual ubicado en el mismo lugar durante la simulación.
- 5.- Calcular la desviación de la raíz cuadrada media (RMSE por sus siglas en inglés), suponiendo que se cuenta con datos reales y que estos fueron obtenidos días inmediatamente después de que el tsunami afectara a la zona de estudio.

Otra forma de evaluar si la modelación, y por lo tanto, las mallas que se están utilizando están entregando resultados aceptables, es utilizar lo definido por Aida (1978), esto corresponde a la obtención de la desviación de estándar (K) y de la varianza (k) utilizando las ecuaciones que se presentan a continuación:

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (29)$$

$$\log k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2} \quad (30)$$

Donde K_i corresponde a la razón entre los datos medidos (X_i) y los datos obtenidos de la simulación (y_i) para un mismo punto.

La sociedad de ingenieros civiles japonés (JSCE por sus siglas en inglés) sugirió en el 2002 que los valores de la desviación (K) y de la varianza (k) se deben encontrar entre ciertos valores para poder considerar que los resultados de simulación son aceptables. (Suppasri, Koshimura, & Imamura, 2011)

$$0.95 < K < 1.05$$

$$k < 1.45$$

3.1.3 Escenarios propuestos

Para poder definir escenarios para la zona de estudio, es necesario realizar un análisis de sismicidad de la zona, es decir, reunir información de sismos y tsunamis que pudieron haber afectado a Coquimbo en el pasado.

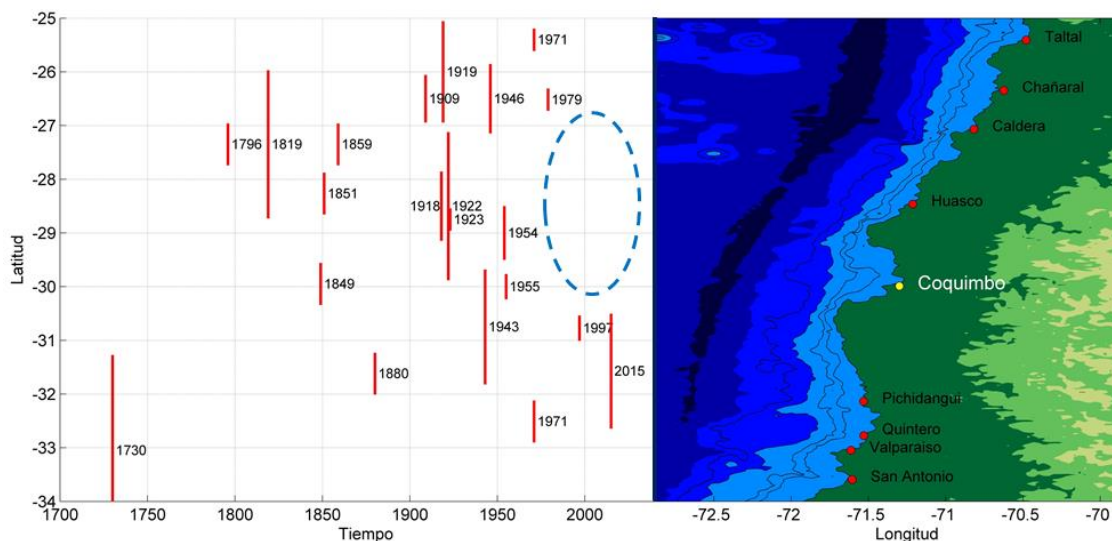


Figura 32: Sismos que han afectado con anterioridad al norte de Chile.

Fuente: (Métois, Vigny, & Socquet, 2016) Modificado.

La Figura 32 muestra en una línea de tiempo los sismos que han afectado a Chile (desde Concepción a Arica) y la zona de ruptura de cada uno de estos. Además en un círculo azul se resalta la zona donde existe una brecha sísmica, y por lo tanto, donde se espera ocurra un sismo.

No es posible predecir cuándo ocurrirá un sismo, pero si se puede estimar donde podría ocurrir uno y que magnitud podría tener teniendo en consideración la cantidad de años en que no se ha liberado energía.

En la tabla 8 se presenta la recopilación de los sismos que afectaron al norte de Chile, donde X_o e Y_o representan el epicentro del sismo. Esta información fue obtenida de Beck, Barrientos, Kausel, & Reyes, (1998), Lomnitz, (2004), Soloviev & Go, (1984), Métois et al., (2016), Universidad de Chile, (2016) y (USGS, (2016).

Tabla 8: Sismos que han afectado al norte de Chile cercanos a zona de estudio

Fuente: Recopilación de diferentes fuentes.

Día	Mes	Año	Magnitud	Ciudad	Xo	Yo	Prof
8	julio	1730	8.5a9	Valparaiso	-33.05	-71.63	-
30	marzo	1796	7.5	Copiapo	-27.35	-70.35	-
3	abril	1819	-	Copiapo	-	-	-
4	abril	1819	-	Copiapo	-	-	-
11	abril	1819	8.5	Copiapo	-27.35	-70.35	-
17	noviembre	1849	7.5	Coquimbo	-29.95	-71.37	-
26	mayo	1851	7.5	Huasco	-28.266	-71.22	-
5	octubre	1859	7.5	Copiapo	-27.35	-70.35	-
15	agosto	1880	7.5	Illapel	-31.62	-71.18	-
20	mayo	1918	7.9	Huasco	-28.5	-71.5	-
18	diciembre	1918	7 a 7.5	Copiapo	-	-	60
10	noviembre	1922	8.4	Huasco - Vallenar	-28.5	-70	25
4	mayo	1923	7	-	-28.75	-71.75	60
6	abril	1943	8.3	Illapel	-30.75	-72	55
2	agosto	1946	7.9	Chañaral	-26.5	-70.5	50
8	febrero	1954	7.7	Vallenar	-29	-70.5	-
19	abril	1955	7.1	Coquimbo	-30	-72	-
3	agosto	1979	7	Copiapo	-26.518	-70.664	49
15	octubre	1997	7.1	Coquimbo	-30.773	-71.315	56
8	junio	1909	7.6	Chañaral	-26.5	-70.5	-
8	julio	1971	7.5	La ligua	-32.511	-71.207	40
17	junio	1971	7	Copiapo	-25.402	-69.058	-
9	agosto	1869	-	Coquimbo	-	-	-
7	julio	1873	-	-	-	-	-
16	septiembre	2015	8.3	Illapel	-31.573	-71.674	12_33
-	-	1604	-	La Serena	-	-	-
-	-	1648	-	Coquimbo	-	-	-
-	-	1792	-	La Serena	-	-	-

De acuerdo a la tabla anterior, y teniendo en consideración la brecha sísmica aún presente en el sector a pesar del sismo ocurrido el 16 de septiembre del 2015, se pueden plantear los siguientes escenarios (Tabla 9).

Tabla 9: Escenarios propuestos para Coquimbo

Fuente: Elaboración propia

Mw	L	W	Strike	Dip	Rake	X	Y	Prof	Slip
7.8	125 km	40 km	10.93°	15°	110°	-30.266°S	287.49°E	10 km	5.01 m
8.0	162 km	50 km	10.41°	15°	110°	-30.266°S	287.49°E	10 km	6.31 m
8.2	209 km	63 km	11.18°	15°	110°	-30.266°S	287.49°E	10 km	7.94 m

Los parámetros para generar la condición inicial fueron obtenidos utilizando la formulación de Okada (ecuaciones 8 y 9).

En la Figura 33 se presenta un aproximado de la ubicación geográfica del plano de falla para los tres escenarios propuestos. El rectángulo amarillo representa la zona que abarcaría el sismo de 7.8 Mw (S1), en verde se presenta el sismo de 8.0 Mw (S2) y en blanco el sismo de 8.2 Mw (S3). El rectángulo rojo representa el evento ocurrido el 16 de septiembre del 2015 que afectó a la zona de estudio y de la que se tienen registros de inundación.

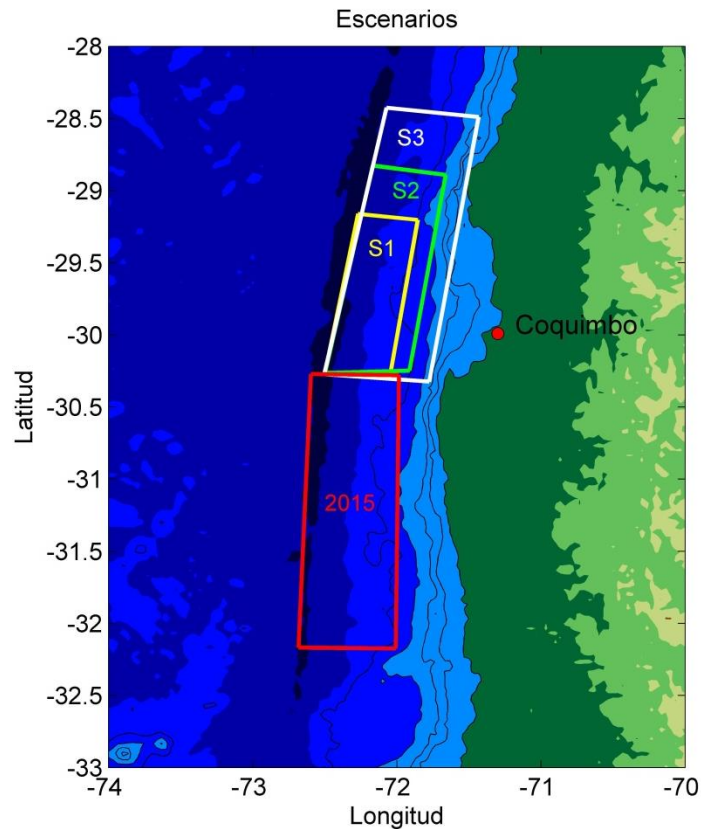


Figura 33: Escenarios propuestos para Coquimbo

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó el modelo numérico NEOWAVE para generar los mapas de inundación de los escenarios propuestos, también se realizó la modelación necesaria para la validación de la mallas.

3.2 Curvas de Fragilidad

3.2.1 Clasificación de estructuras

Según lo descrito en el apartado 2.5.2 la clasificación de estructuras puede ser definida como “sobrevive o colapsa”,

La clasificación de las estructuras de la zona de estudio (Coquimbo) ya fue realizada en un estudio previo que fue elaborado inmediatamente días después del evento del 16 de septiembre del 2015 siguiendo los procedimientos descritos en el apartado 2.5. (Urrea et al., 2016)

El resultado de la clasificación de estructuras es lo que puede apreciar en la figura 34 a), donde se muestra en color rojo las estructuras que han sido clasificadas como destruidas, y en color azul las estructuras que fueron clasificadas como sobrevivientes. En la Figura 34 b) se muestra la inundación provocada por el tsunami que se generó en el año 2015. La máxima inundación registrada en una edificación fue de 3.515 m.

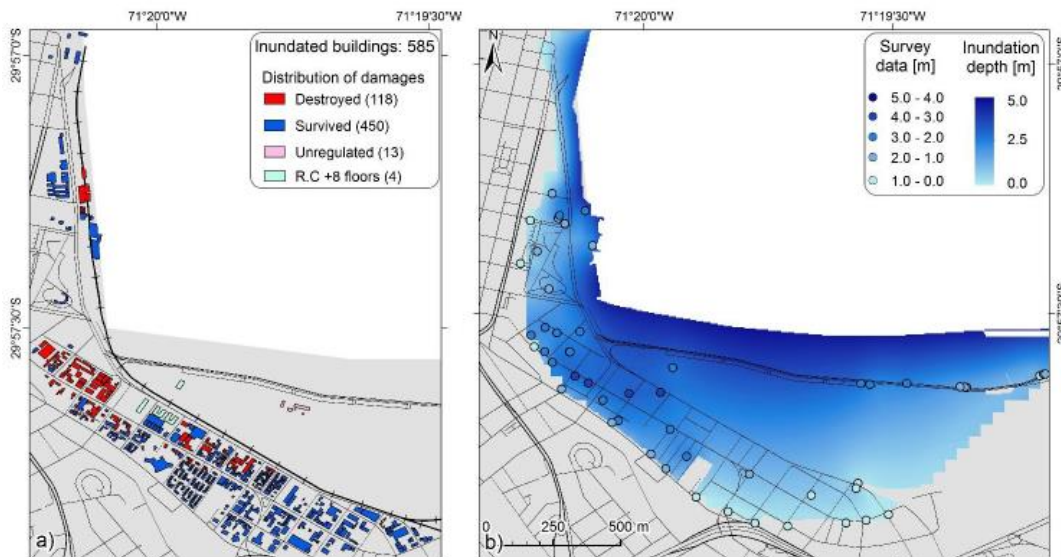


Figura 34: Desarrollo de la curva de fragilidad para Coquimbo. a) Evaluación del daño en las estructuras. b) Profundidad de inundación del tsunami, puntos medidos y la interpolación del área. Fuente: (Urrea et al., 2016)

Una vez finalizada la clasificación de estructuras, se generó la curva de fragilidad siguiendo los procedimientos de Koshimura (2009) (presentados en el apartado 2.5.1), de acuerdo a esto, lo primero que se realizó fue un histograma que representa la cantidad de casas que fueron seleccionadas por tramo (60 casas por tramo), y de cada tramo cuantas fueron catalogadas como sobrevivientes y arrasadas. A los datos obtenidos, se les calculó la probabilidad de daño utilizando la distribución Normal y Log-Normal según lo definido por Koshimura.

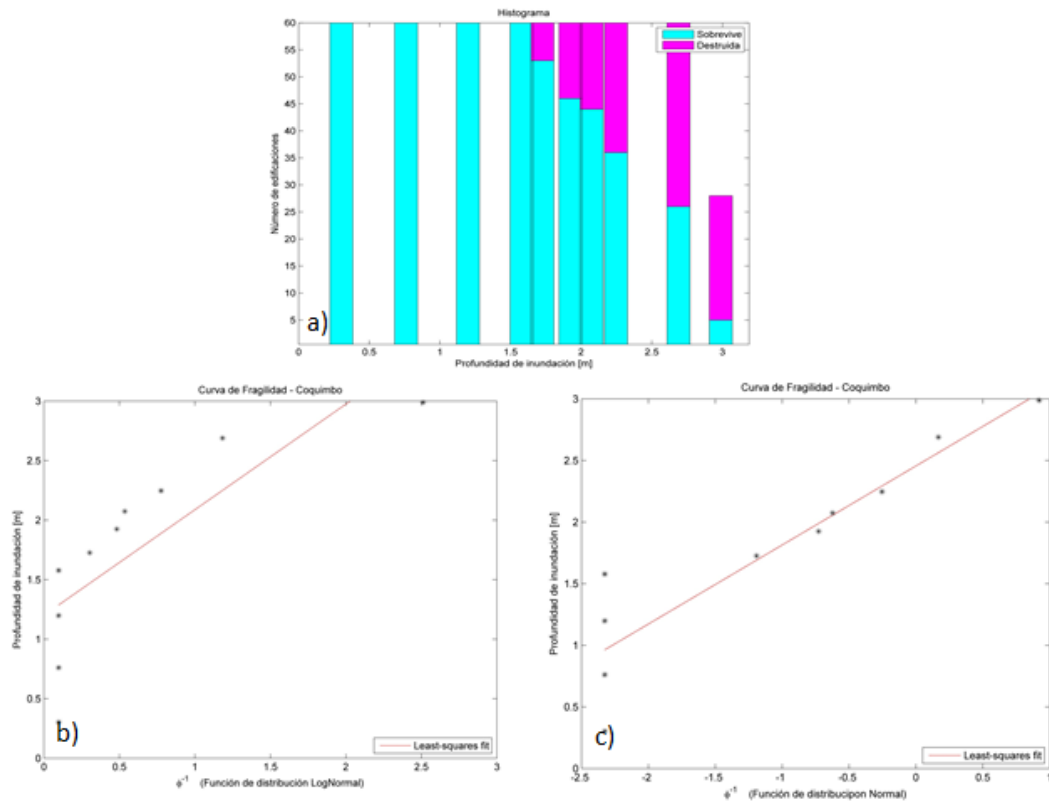


Figura 35: a) Histograma de las estructuras arrasadas y sobrevivientes., b) Ajuste de mínimos cuadrados para la distribución Log-Normal, c) Ajuste de mínimos cuadrados para la distribución Normal.

Fuente: (Urrea et al., 2016)

Y por último, utilizando la distribución con el mejor el ajuste, se generó la curva de fragilidad que se presenta en la Figura 36. Los datos para generar esta curva son los presentados en la Tabla 10.

Tabla 10: Parámetros que se utilizaron para generar la curva de fragilidad

Distribución	Normal
R²	0.849
Media	2.455
Desviación estándar	0.641
Cantidad de tramos	10
Edificaciones por tramo	60
Edificaciones evaluadas	568

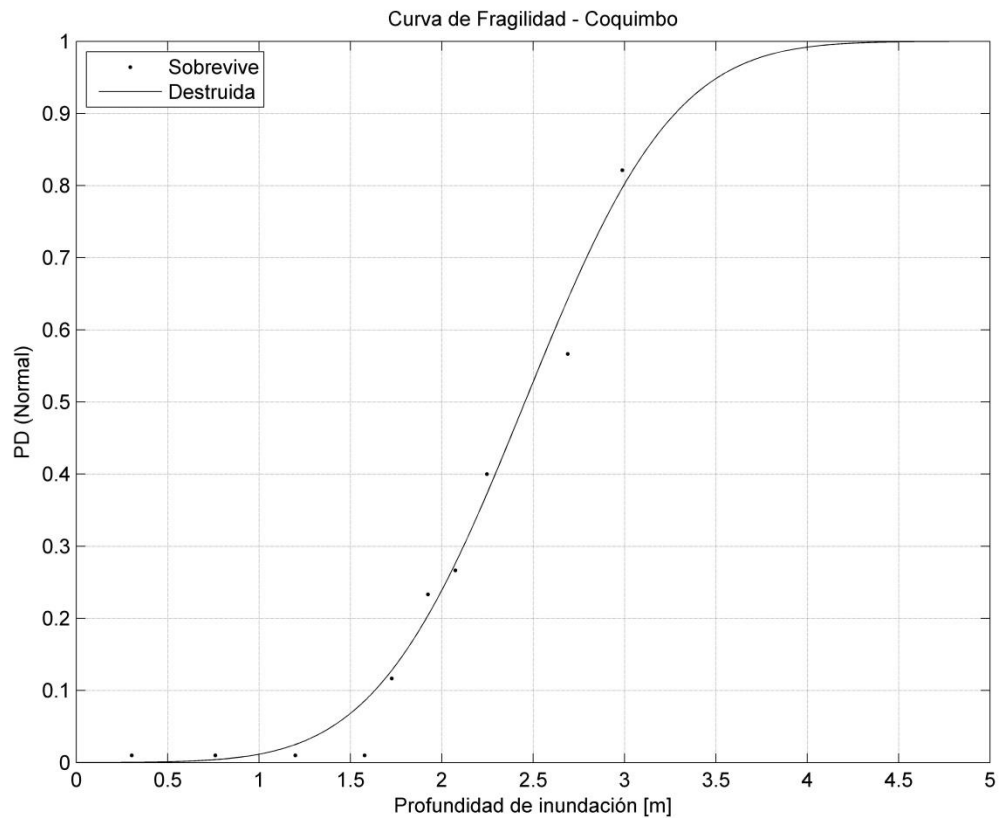


Figura 36: Curva de fragilidad para Coquimbo
Fuente: (Urria et al., 2016)

3.2.2 Estimación de daños

El primer paso para poder realizar la estimación de daños, es obtener la profundidad de inundación a la que se verá afectada cada edificación de la zona de estudio. Es importante mencionar que la inundación asignada a cada edificación es obtenida en el centro del rectángulo que representa la estructura. (Figura 37.)

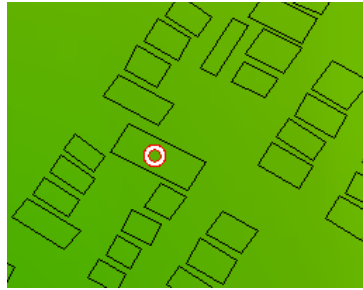


Figura 37: Ejemplo de la obtención de la profundidad de inundación asignada a cada casa.
Fuente: Global Mapper.

A cada edificación se le asignó un número para poder identificarla, y se le asoció la inundación correspondiente. Luego esta inundación fue ordenada de forma ascendente tal como se muestra en la Figura 38.

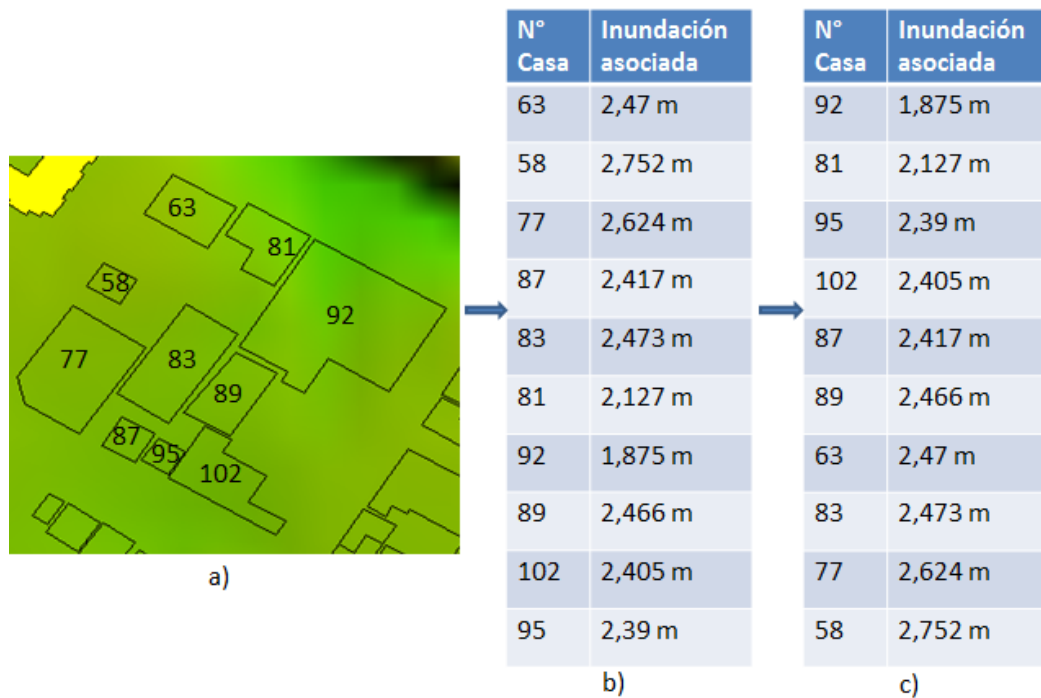


Figura 38: a) Asignación de un número a cada edificación., b) Inundación asociada a cada casa., c) Inundación ordenada de forma ascendente.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que las inundaciones son ordenadas de forma ascendente, se procede a separar las edificaciones en tramos, a modo de ejemplo, los tramos a considerar serán de 2 y 4 edificaciones por tramo, es decir, se obtiene lo presentado en la Figura 39.

N° Casa	Inundación asociada	Promedio por tramo	N° Casa	Inundación asociada	Promedio Por tramo
92	1,875 m	2,001 m	92	1,875 m	2,199 m
81	2,127 m		81	2,127 m	
95	2,39 m	2,398 m	95	2,39 m	
102	2,405 m		102	2,405 m	
87	2,417 m	2,442 m	87	2,417 m	2,457 m
89	2,466 m		89	2,466 m	
63	2,47 m	2,472 m	63	2,47 m	
83	2,473 m		83	2,473 m	
77	2,624 m	2,688 m	77	2,624 m	2,688 m
58	2,752 m		58	2,752 m	

a) b)

Figura 39: a) Dos casas por tramo., b) Cuatro casas por tramo.
Fuente: Elaboración propia.

Con el promedio obtenido en cada tramo se ingresa a la curva de fragilidad de la Figura 37 para obtener la probabilidad de daño del tramo que se está evaluando. Continuando con el ejemplo, las probabilidades de daño serían las presentadas en la Figura 40.

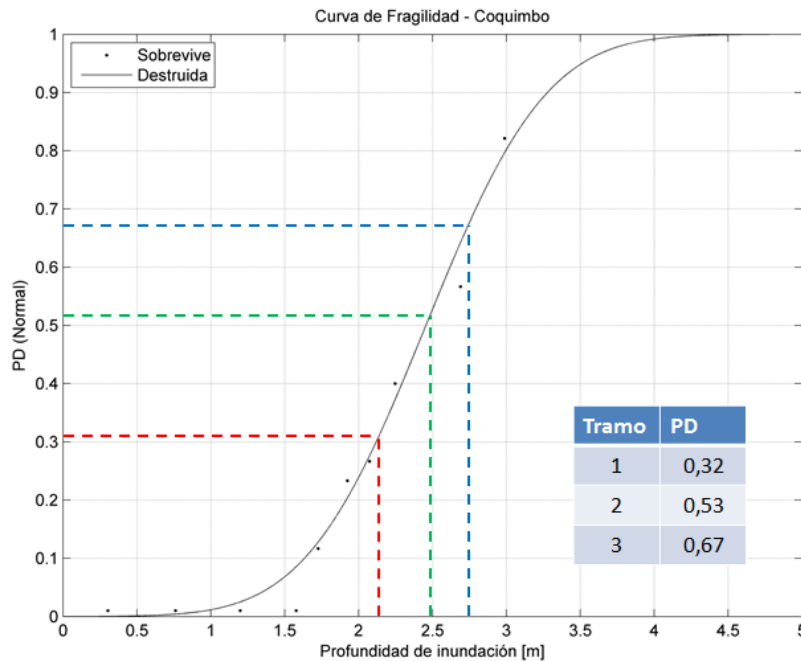


Figura 40: PD por tramo considerando cuatro casas por tramo.
Fuente: Elaboración propia.

Para el primer tramo, en el que se obtuvo un promedio de 2.199 m (cuatro casas por tramo), se obtiene una probabilidad de daño de 0.32, es decir, que el 32 % de las casas de ese tramo serán catalogadas con un alta probabilidad de daño, y el resto con una baja probabilidad de daño.

El 32% de 4 casas es 1.28, es decir, solo una casa de ese tramo será catalogada con una alta probabilidad de daño, y las tres casas restantes con una baja probabilidad de daño, se considerará que la o las casas con alta probabilidad de daño serán las con mayor altura de inundación de cada tramo. Para el ejemplo mencionado, la casa catalogada con una alta probabilidad de daño es la N°102 para el primer tramo.

La Figura 41 muestra un ejemplo de los descrito anteriormente, y como esta información es utilizada para realizar un mapa de daño.

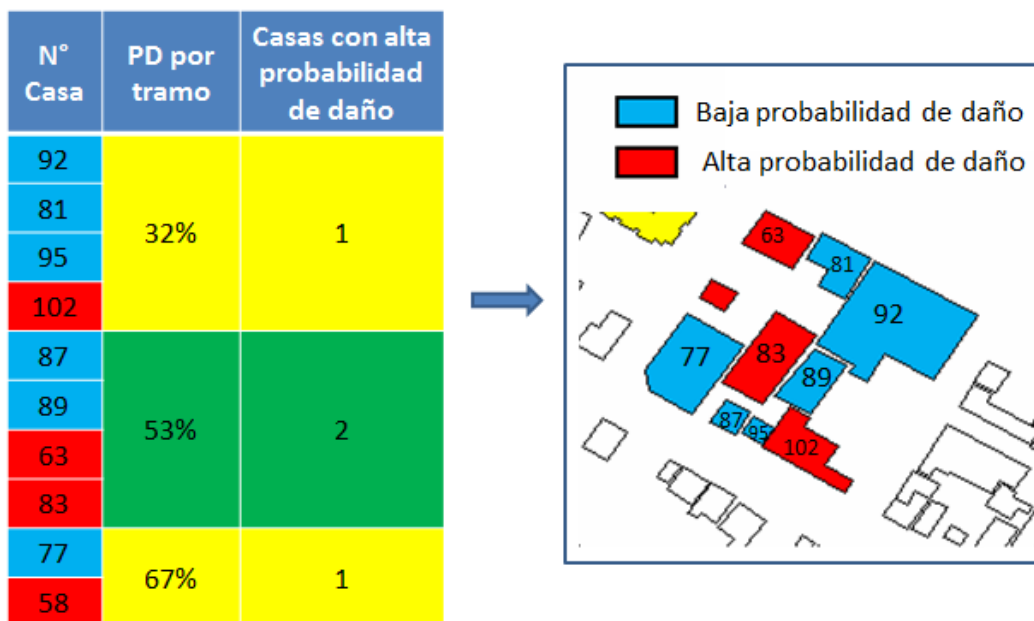


Figura 41: Casas catalogadas con alta y baja probabilidad de daño y el mapa de daño resultante.

Fuente: Elaboración propia.

Para los eventos propuestos, se realizarán tramos de 20, 30, 40, 50, 60 y 65 casas, para así evaluar qué diferencia se produce al escoger diferentes cantidades de casas.

4. Resultados

Se comenzará presentando los resultados de la validación de las mallas, luego las simulaciones de los eventos propuestos y por último la estimación de daños propuestos para dos de los tres eventos.

4.1 Validación de las mallas

La validación de las mallas se realizó de dos formas, la primera fue efectuando una comparación de datos registrados en el mareógrafo de Coquimbo durante el evento ocurrido el 16 de septiembre del 2015 y los datos obtenidos de la simulación para el mismo punto y mismo evento. La segunda forma de validación será a través de las formulaciones propuestas por Aida en 1978 y con los rangos definidos por JSCE en el 2002.

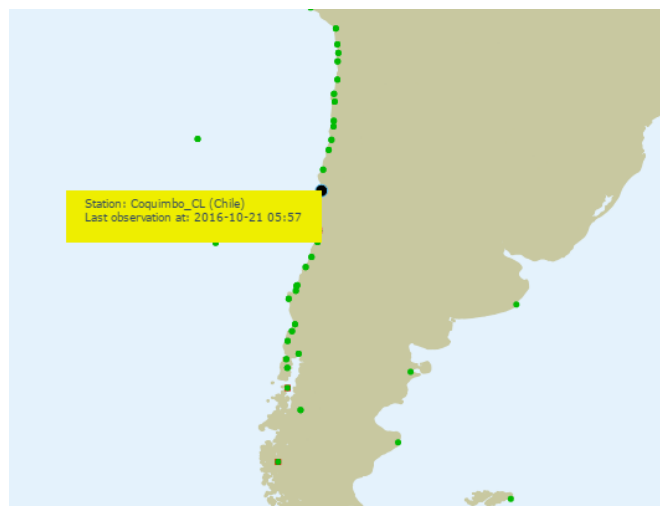


Figura 42: Mareógrafo ubicado en la ciudad de Coquimbo
Fuente: (UNESCO, 2016)

La simulación del evento del 2015, comprende un modelo de falla finita donde los parámetros utilizados en cada segmento fueron entregados por Yuji Yagi (Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japon).

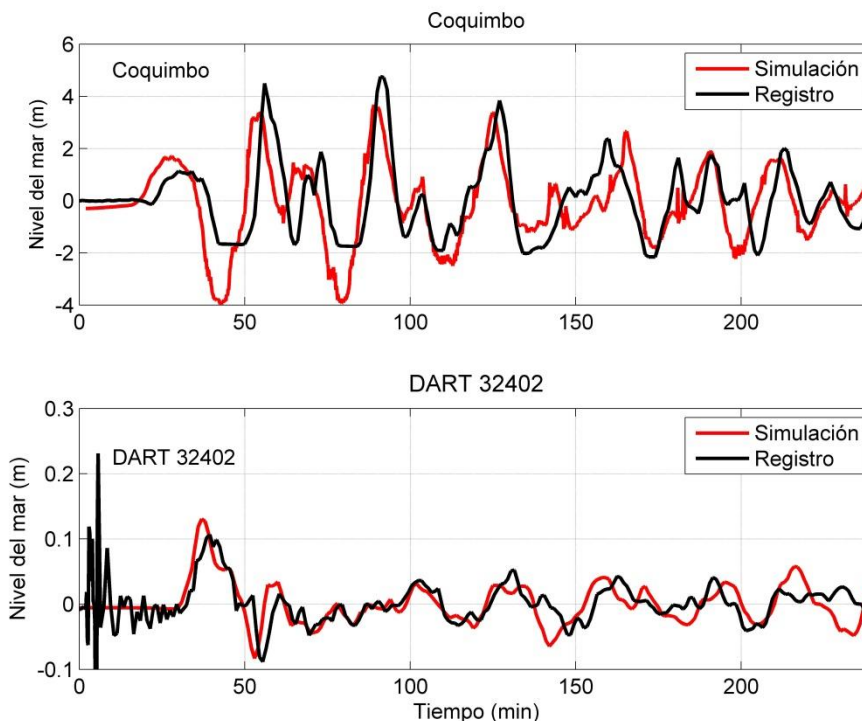


Figura 43: Comparación entre la simulación y lo registrado durante el evento del 2015.
Fuente: Matlab y sea level monitoring.

En la Figura 43 se presenta el resultado de la comparación de los datos registrados y los datos simulados, se aprecia que la simulación entrega una serie de tiempo muy similar a lo registrado, sin embargo se distingue que algunos puntos estarían siendo subestimados.

En la Tabla 11 se presentan los resultados de la validación de las mallas utilizando las formulaciones de Aida (ecuaciones 29 y 30).

Tabla 11: Resultado de los parámetros.

Simulación	Sin modificación del slip	Modificando el slip (+1.16 m)	Rangos propuestos por JSCE
K	1,26	1,03	$0,95 < K < 1,05$
k	1,14	1,13	$k < 1,45$

Por lo tanto, viendo que la comparación con el mareógrafo resulta ser muy similar, y que la desviación estándar y la varianza obtenidas con las formulaciones de Aida están

dentro de los rangos propuestos por JSCE, se asume que las mallas son óptimas para realizar las simulaciones con los eventos propuestos.

4.2 Simulación de los eventos propuesto

En la Figura 44 se presenta la propagación en el tiempo donde se puede apreciar la condición inicial para cada uno de los eventos.

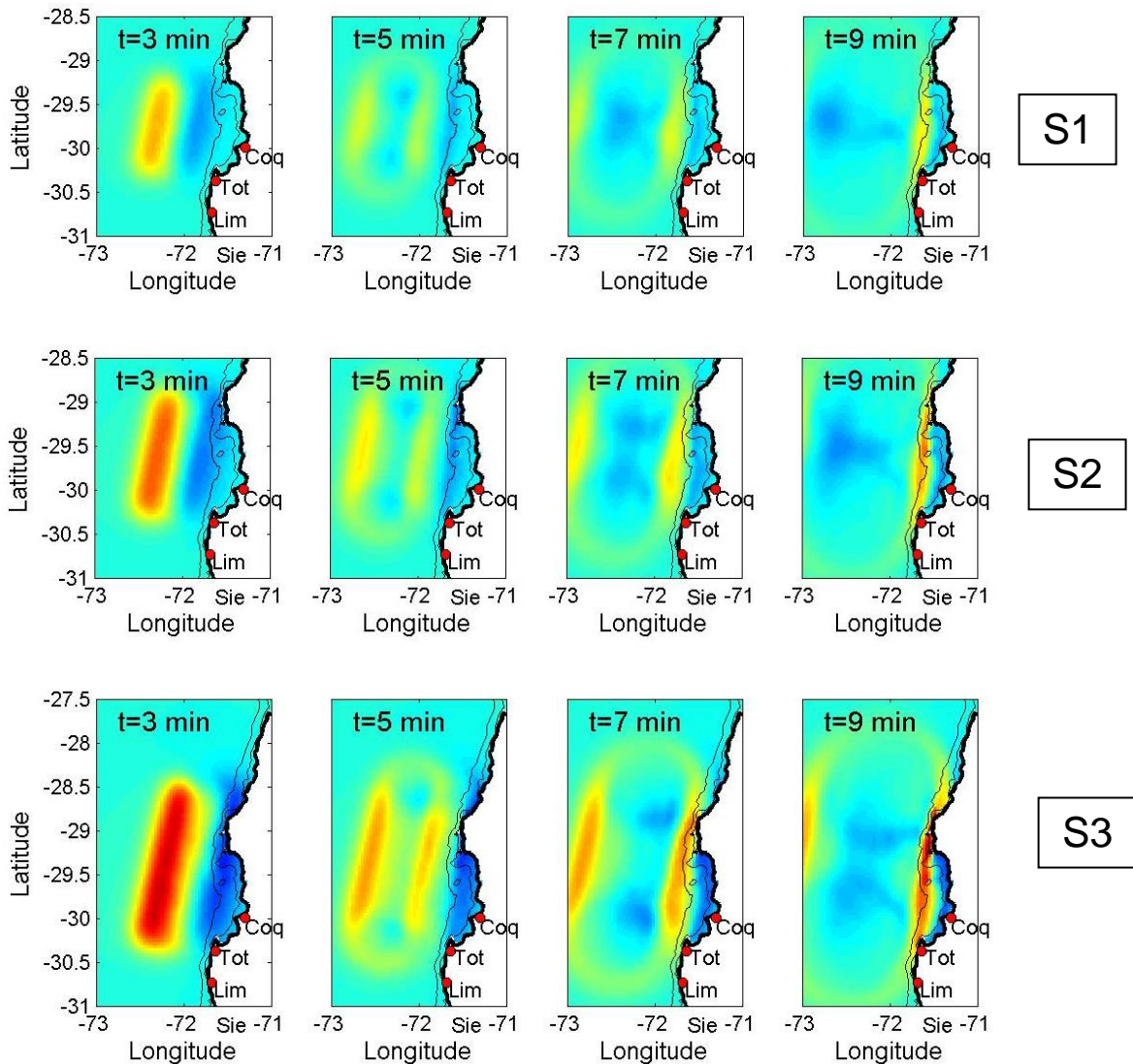


Figura 44: Rompimiento del segmento para las simulaciones propuestas.

Fuente: Matlab, elaboración propia.

4.2.1 Simulación 1 (S1)

La simulación uno (S1), corresponde al evento de magnitud 7.8 Mw ubicado frente a la ciudad de Coquimbo que fue definido en el apartado 3.1.3.

La gráfica de la Figura 45 muestra la serie de tiempo de las 2 primeras horas del mareógrafo virtual ubicado en las coordenadas 288.66°E y -29.95°S (mismas coordenadas del mareógrafo real presente en la ciudad de Coquimbo). La máxima inundación se produce a los 50 minutos aproximadamente, siendo posible apreciar que la máxima inundación tendrá una altura de 4.92 m.

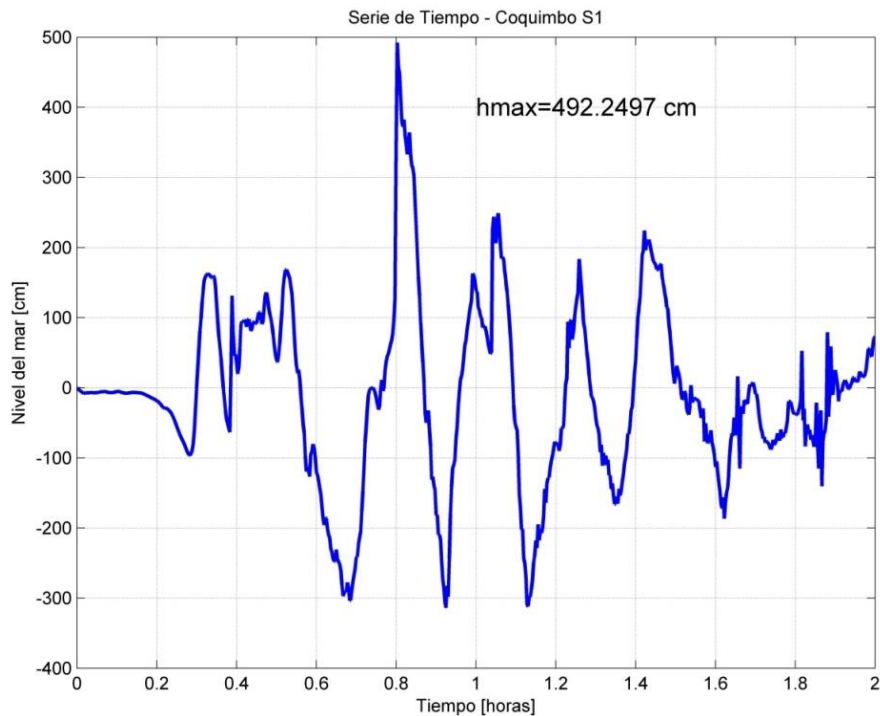


Figura 45: Serie de tiempo para S1.
Fuente: Matlab, elaboración propia.

La Figura 46 muestra las profundidades de inundación que se generarían con un evento de magnitud 7.8 frente a la ciudad de Coquimbo. Ya se mencionó que la altura máxima de inundación es de 4.92 metros, pero esta inundación se produce en el mareógrafo (Gauge) y no en el sector residencial que es en el que se enfoca este proyecto. De la imagen se puede inferir que las inundaciones en el sector residencial

no superan el metro, por lo tanto, no son de interés para el tipo de estudio que se quiere realizar.

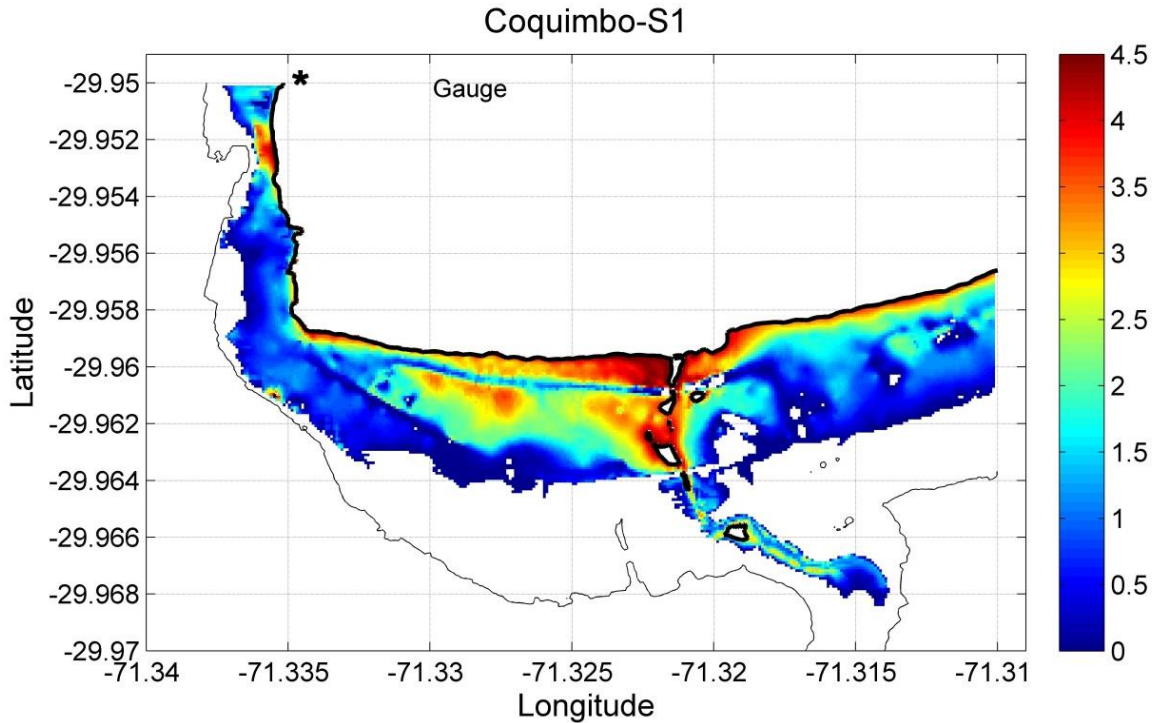


Figura 46: Profundidad de inundación para S1, medida en metros.
Fuente: Matlab, elaboración propia.

4.2.2 Simulación 2 (S2)

Los resultados de la simulación 2 (S2) muestran que la máxima inundación que se produce en el mareógrafo es de 5.59 m, siendo apreciable, que esta inundación se origina a los 50 minutos aproximadamente. También es posible observar que esta inundación se genera con la llegada de la tercera ola (Figura 47).

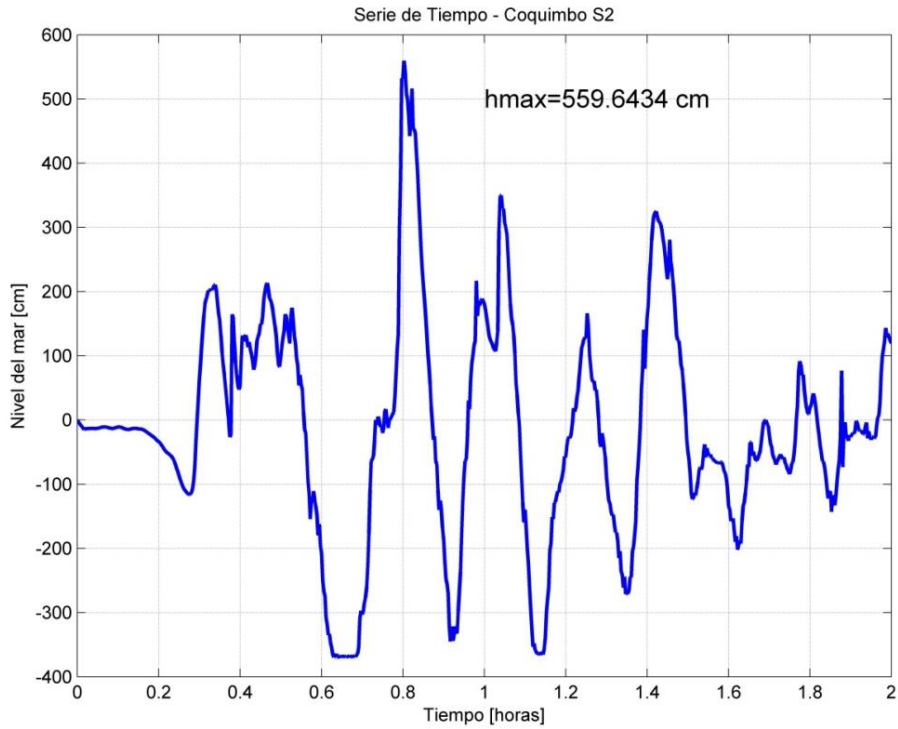


Figura 47: Serie de tiempo para S2.
Fuente: Matlab, elaboración propia.

Si ocurriese un evento de magnitud 8.0 frente a Coquimbo, la inundación que afectaría al sector residencial resulta ser muy similar a la registrada durante el evento del 2015. La inundación provocada por el S2 es presentada en la Figura 48.

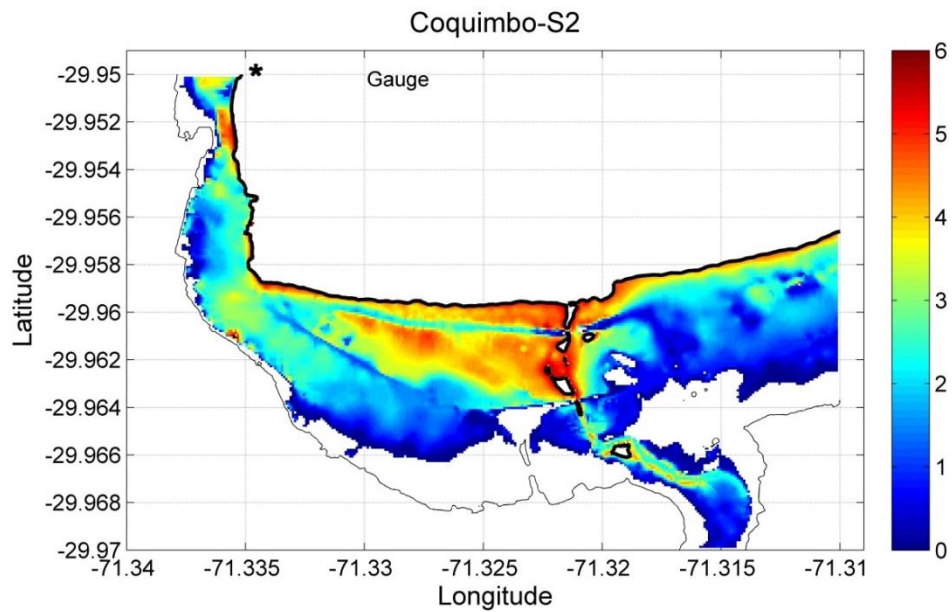


Figura 48: Profundidad de inundación en metros sobre la zona de estudio
Fuente: Matlab, elaboración propia.

4.2.3 Simulación 3 (S3)

La simulación 3 (S3) entrega como resultado una altura de inundación de 7.23 m en el mareógrafo virtual, esta inundación (al igual que en las simulaciones 1 y 2) ocurre a los 50 minutos aproximadamente y se genera con la llegada de la segunda ola (Figura 49).

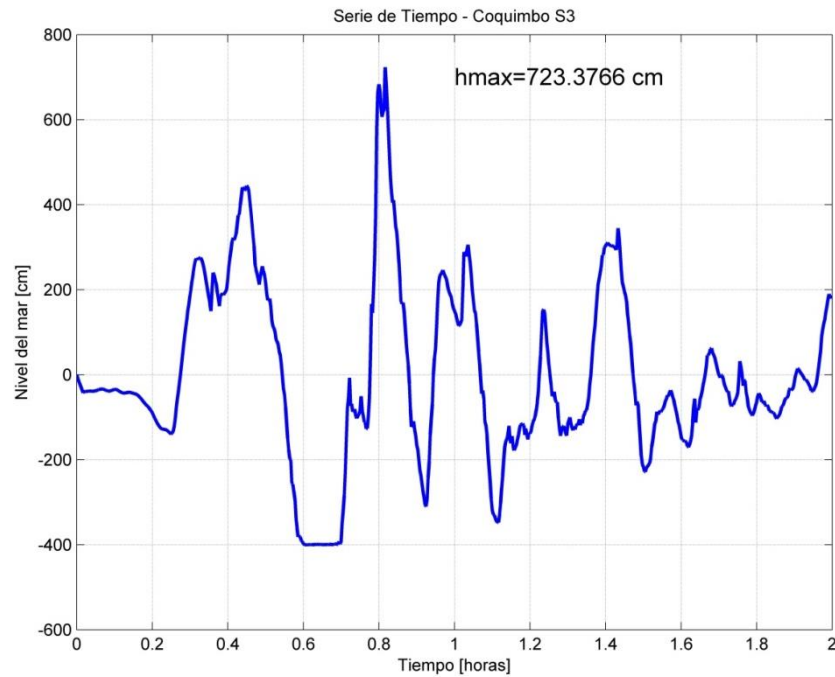


Figura 49: Serie de tiempo para la simulación 3 en centímetros.

Fuente: Matlab, elaboración propia.

La Figura 50 muestra la profundidad de inundación que afectaría a la zona de estudio. Se puede apreciar que en el sector residencial se producen inundaciones mayores que las entregadas por las simulaciones anteriores, por lo tanto, este escenario resulta ser el más desfavorable.

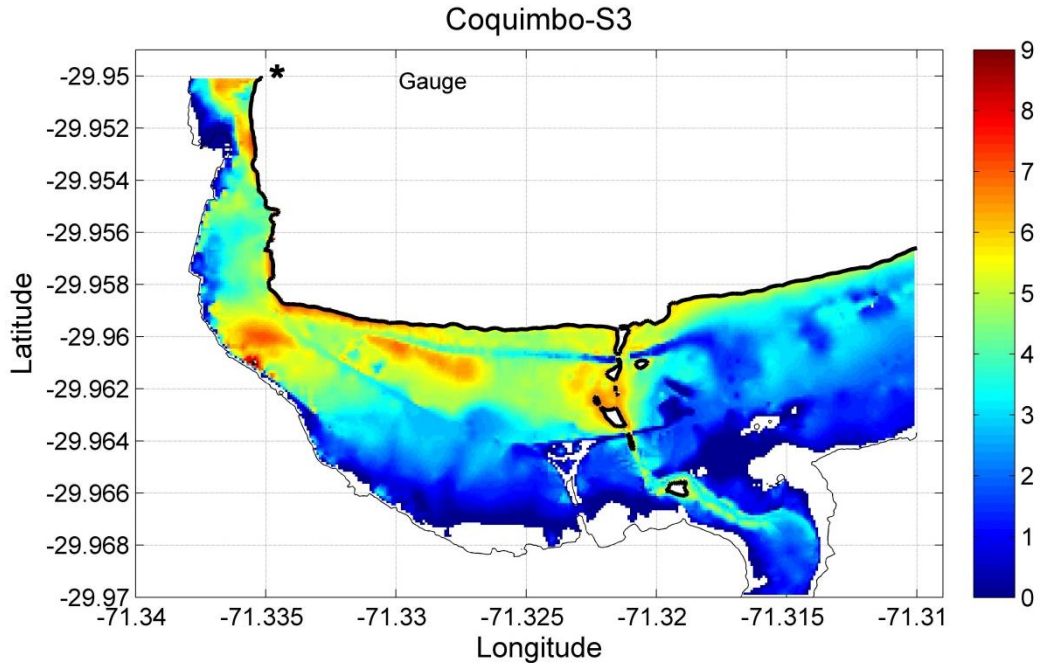


Figura 50: Profundidad de inundación de la simulación 3
 Fuente: Matlab, elaboración propia.

Para realizar la estimación de daños solo se consideró las simulaciones 2 y 3, ya que son las que presentan profundidades de inundación en el sector residencial.

4.3 Estimación de daños

Al resultado de las simulaciones 2 y 3, se le superponen las edificaciones que serán evaluadas para realizar la estimación de daños, se debe mencionar que se agregaron 47 edificaciones (indicadas con color rojo en las Figuras 51 y 52) que no fueron consideradas para realización de la curva de fragilidad del evento del 2015, sin embargo, se puede apreciar que los eventos propuestos si generan inundación en las edificaciones incorporadas. Por lo tanto el total de edificaciones a considerar corresponde a 617.

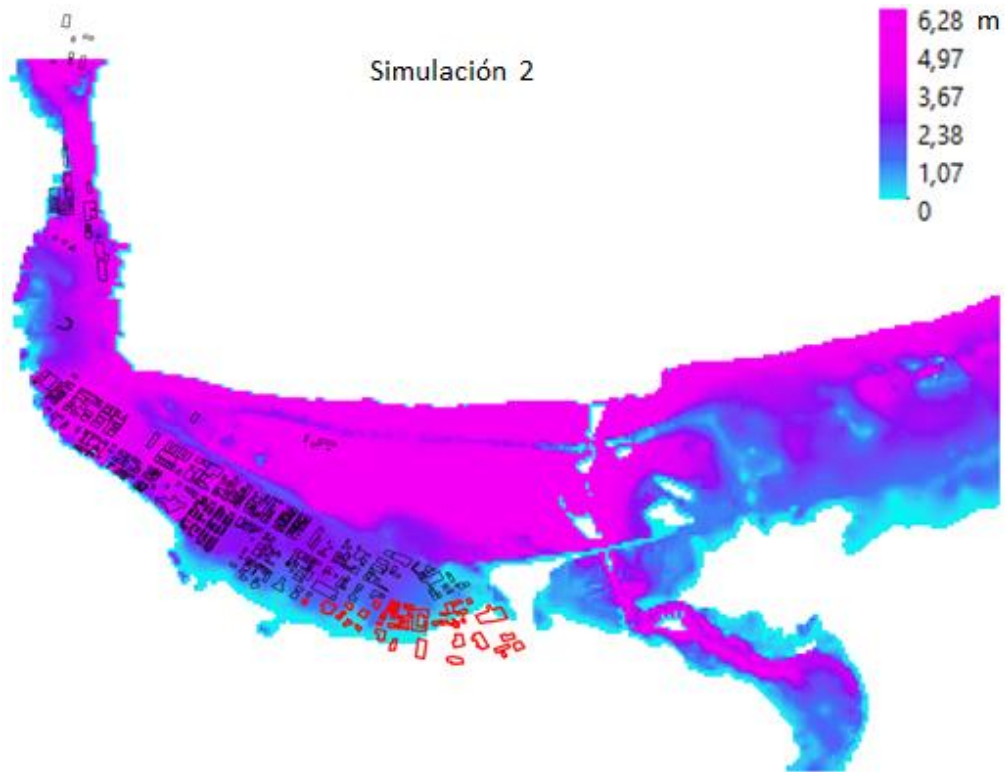


Figura 51: Superposición del mapa de inundación para simulación 2 con las edificaciones a considerar.

Fuente: ArcGis, elaboración propia.

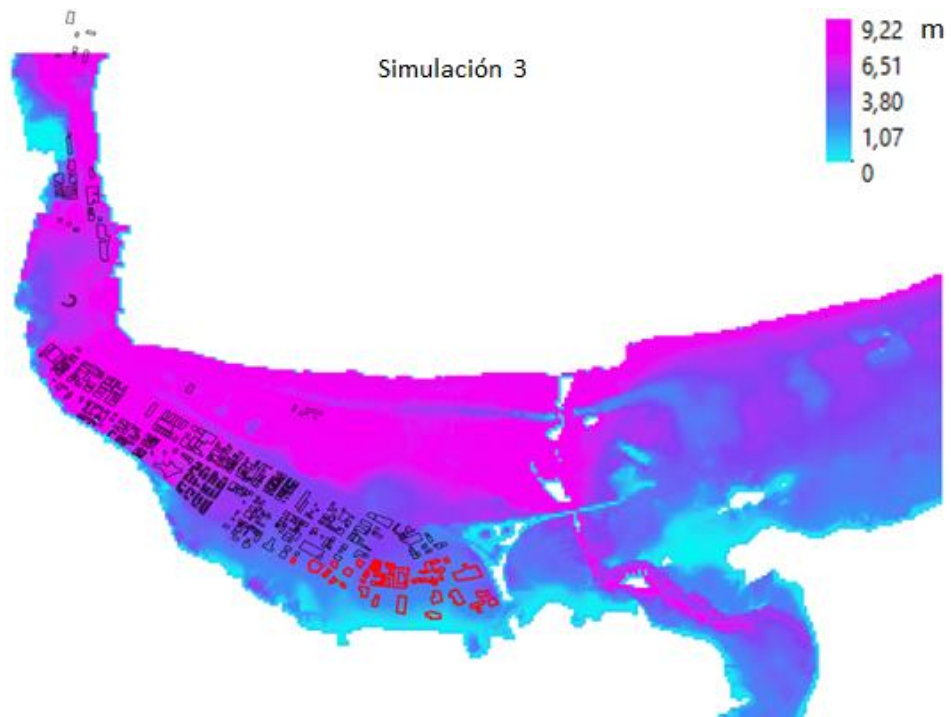


Figura 52: Superposición del mapa de inundación para simulación 2 con las edificaciones a considerar.

Fuente: ArcGis, elaboración propia.

Para la simulación 2, la máxima inundación registrada en una edificación corresponde a 5.3 m, mientras que para la simulación 3, la máxima inundación corresponde a 8.3 m. Las edificaciones se agruparon en 6 diferentes tramos para ambas simulaciones:

- 20 casas por tramo
- 30 casas por tramo
- 40 casas por tramo
- 50 casas por tramo
- 60 casas por tramo
- 65 casas por tramo

4.3.1 Estimación de daños para S2

De acuerdo a la metodología explicada anteriormente, se presenta en la Tabla 12 los resultados de cada uno de los tramos. Se debe mencionar que de las 617 edificaciones, no se evaluaron las edificaciones con más de cuatro pisos, y solo se consideró las casas que registraron alguna inundación, por lo tanto, para S2 solo se evaluó 596 casas.

Tabla 12: Resultados por tramo para S2.

Fuente: Elaboración propia.

Casas por tramo	Total de casas inundadas	Casas con alta probabilidad de daño	Casas con baja probabilidad de daño
20	596	202 (34%)	394 (66%)
30		196 (33%)	400 (67%)
40		190 (32%)	406 (68%)
50		182 (31%)	414 (69%)
60		181 (30%)	415 (70%)
65		195 (33%)	401 (67%)

Considerando los resultados obtenidos, se puede generar el siguiente mapa de daño, en el que se puede apreciar en color verde las edificaciones que serían consideradas sobrevivientes, en color rojo las edificaciones que serían destruidas, en amarillo las estructuras que no fueron evaluadas y en blanco las estructuras que no presentaron inundación.

El mapa de daño que se presenta es solo para 60 casas por tramo, esto porque la curva de fragilidad que se utilizó para la estimación de daños fue realizada considerando 60 casas por tramo. Sin embargo, de la Tabla 14 se puede decir que los porcentajes de las casas con alta probabilidad de daño son muy similares entre sí, por lo tanto los mapas de daños para los diferentes tramos también serán similares en relación a la cantidad de casas que serían catalogadas con alta probabilidad de daño.

De las edificaciones analizadas, 415 son catalogadas con baja probabilidad de daño y 181 con alta probabilidad de daño, es decir que para un evento de magnitud 8.0 frente a la costa de Coquimbo se espera que el 30% de las estructuras sean arrasadas o destruidas.

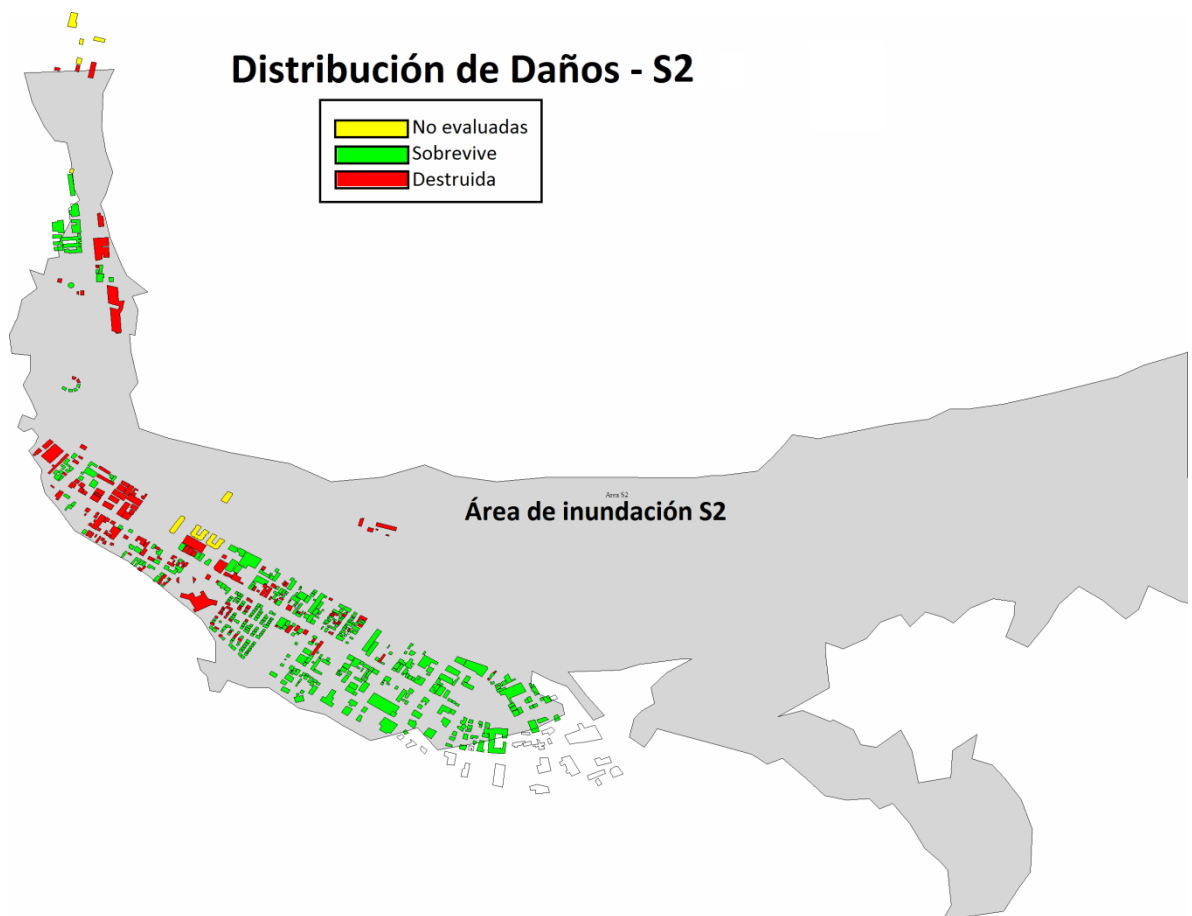


Figura 53: Distribución de daños en dos niveles para un evento de magnitud 8.0
Fuente: Global mapper, elaboración propia.

4.3.2 Estimación de daños para S3

Al igual que para la simulación 2, la estimación de daños se realizó para todos los tramos definidos anteriormente, pero sólo se presentará el mapa de daño para el caso de 60 casas por tramo. Se debe mencionar que de las 617 edificaciones, no se evaluaron las edificaciones con más de cuatro pisos, y solo se consideró las casas que registraron alguna inundación, por lo tanto, para S3 solo se evaluó 613 casas.

Tabla 13: Resultados por tramo para S3.

Fuente: Elaboración propia.

Casas por tramo	Total de casas inundadas	Casas con alta probabilidad de daño	Casas con baja probabilidad de daño
20	613	478 (78%)	135 (22%)
30		476 (78%)	137 (22%)
40		477 (78%)	136 (22%)
50		473 (77%)	140 (23%)
60		474 (77%)	139 (23%)
65		476 (78%)	137 (22%)

Al igual que para la simulación 2, sólo se presenta el mapa de daño para 60 casas por tramo, esto porque los porcentajes son muy similares entre sí y porque la curva de fragilidad utilizada para la estimación de daños fue realizada considerando 60 casas por tramo. De las 613 edificaciones que se evaluaron, 474 son catalogadas como destruidas o arrasadas y 139 como sobrevivientes, es decir, que el 77% de las estructuras serían arrasadas si llegase a ocurrir un evento de magnitud 8.2 frente a las costas de Coquimbo.

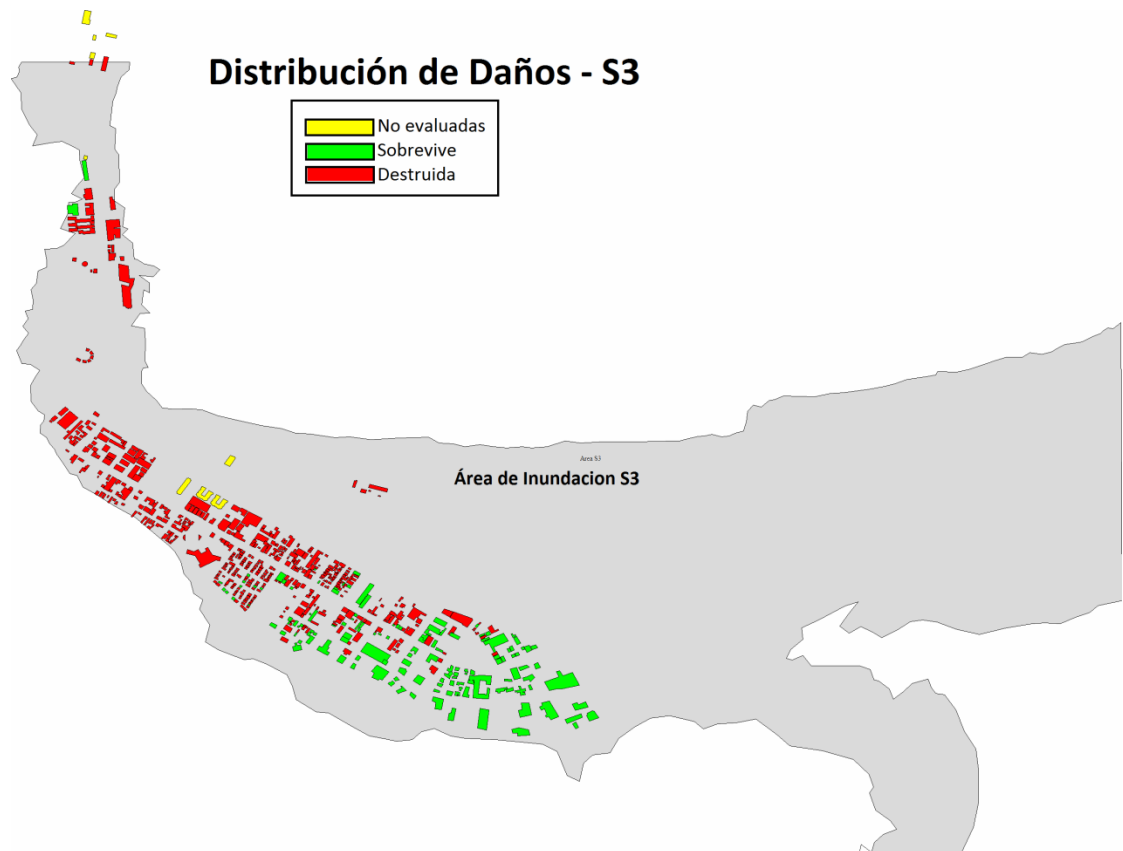


Figura 54: Distribución de daños en dos niveles para un evento de magnitud 8.2.
Fuente: Global mapper, elaboración propia

La máxima inundación obtenida en las edificaciones para la simulación 2 es de 5.3 metros, mientras que para la simulación 3 corresponde a 8.3 metros. Teniendo en consideración la magnitud de las inundaciones, es fácil esperar que con la simulación 3 se obtenga un mayor número de casas colapsadas. A modo de resumen de los mapas de daños presentados se creó la Tabla 14 en la que además se presenta la máxima inundación obtenida en los mareógrafos virtuales.

La tabla 14 muestra los resultados obtenidos por tramos. Si se evalúa con más detalle se puede notar para el evento 8.0 Mw que a medida que se incrementa la cantidad de casas por tramo se distingue una leve disminución en la cantidad de casas con alta probabilidad de daño, pero solo es posible apreciar esto hasta 60 casas por tramo, superado ese número se aprecia que el número de casas vuelve a subir sin superar el de 20 casas por tramo. Para el evento 8.2 también es posible apreciar una pequeña disminución si se incrementa el número de casas por tramo, al igual que para el evento 8.0 esta disminución solo se produce hasta las 60 casas por tramo.

Con la finalidad de encontrar una respuesta a este comportamiento, es que se realiza una evaluación de que sucede si se incrementa la cantidad de casas por tramo en 70, 75, 80, 85, 90 y 100. Los resultados de este incremento son los presentados en la Tabla 14.

Tabla 14: Resumen de la estimación de daños.

Evento	Casas por tramo	Total de casas inundadas	Casas con alta probabilidad de daño	Casas con baja probabilidad de daño	Máxima inundación registrada en una estructura	Inundación registrada en el mareógrafo virtual
8.0	20	596	202 (34%)	394 (66%)	5.28 m	5.59 m
	30		196 (33%)	400 (67%)		
	40		190 (32%)	406 (68%)		
	50		182 (31%)	414 (69%)		
	60		181 (30%)	415 (70%)		
	65		195 (33%)	401 (67%)		
	70		184 (31%)	412 (69%)		
	75		171 (29%)	425 (71%)		
	80		183 (31%)	413 (69%)		
	85		193 (32%)	403 (68%)		
	90		177 (30%)	419 (70%)		
100	160 (27%)	436 (73%)				
8.2	20	613	478 (78%)	135 (22%)	8.24 m	7.23 m
	30		476 (78%)	137 (22%)		
	40		477 (78%)	136 (22%)		
	50		473 (77%)	140 (23%)		
	60		474 (77%)	139 (23%)		
	65		476 (78%)	137 (22%)		
	70		473 (77%)	140 (23%)		
	75		473 (77%)	140 (23%)		
	80		472 (77%)	141 (23%)		
	85		473 (77%)	140 (23%)		
	90		474 (77%)	139 (23%)		
100	472 (77%)	141 (23%)				

Para el caso del evento de 8.2 Mw es más fácil observar que sucede cuando se agrupan las edificaciones en diferentes tramos. Este comportamiento puede ser atribuido a que la curva de fragilidad utilizada para estimación estaba realizada para 60

casas por tramo, por lo tanto, es este el máximo valor en el que se deberían agrupar las edificaciones. Se observa además que pasado las 65 edificaciones por tramo el porcentaje de casas con alta probabilidad de daño no muestra cambios. Se puede apreciar que el caso de 20 casas por tramo es cuando se obtiene el porcentaje más alto de casas con probabilidad de daño.

Uno de los supuestos utilizados en este trabajo fue que las casas tendrían una materialidad similar y que por lo tanto no sería necesario evaluar por materialidad, sin embargo en realidad se sabe que no es tan así, se registran casas que tiene una mejor materialidad que otra y que por lo tanto podría disminuir la probabilidad de que esa estructura sufriera daños considerables.

5. Conclusiones

Mejorar la resolución topo-batimétrica de la zona de estudio resultó ser más difícil de lo que se esperaba, esto porque para lograr conseguir una resolución espacial de al menos 10 m, fue necesario realizar una topografía en terreno y tener precaución al unir información proveniente de distintas fuentes ya que estas podían contener error y no estar referidas a un mismo nivel. Sin embargo se logró conseguir una resolución espacial de 10 m en la quinta malla generada con resolución temporal de 0.125 segundos para asegurar la estabilidad en el modelo.

De los eventos propuestos para este trabajo, el evento de magnitud 7.8 (S1) no resulta interesante para este estudio, ya que no genera una inundación de riesgo en la zona residencial (los máximos valores a los que se podrían ver afectas las estructuras son menores a un metro), sin embargo para S1 el mareógrafo virtual registra una altura máxima de inundación de 4.92 m. La simulación 2 y 3, que representan a los eventos de magnitud 8.0 Mw y 8.2 Mw respectivamente si generan una inundación significativa en el área residencial, más certeramente la simulación 2 registra una inundación de 5.2 metros en una edificación, mientras que la simulación 3 registra una inundación 8.3 en una edificación. En el mareógrafo virtual se registró una altura de inundación de 5.59 m para S2 y 7.23 m para S3. La simulación 3 no solo podría provocar profundidades de inundación mayores, sino que además tendrá una mayor intrusión hacia el sector residencial, es decir, inundaría una mayor cantidad de edificaciones. Es importante recordar que los escenarios fueron modelados con un modelo de falla plana, y que por lo tanto se podrían estar sobreestimando las alturas inundación y las áreas de inundación.

La simulación 2 logró inundar 596 casas, de ellas se espera que al menos el 30 % tenga una alta probabilidad de daño si llegase a ocurrir un evento de magnitud 8.0 Mw. La simulación 3 inunda 613 casas, obteniéndose que al menos el 77% de estas tendría una alta probabilidad de daño. El comportamiento observado al variar la cantidad de casas por tramo puede ser atribuido a que la curva de fragilidad utilizada fue construida considerando 60 casas por tramo, por lo tanto, este podría ser el máximo valor en que se debería agrupar las casas. Pero si se quiere encontrar el caso más desfavorable se debería utilizar el menor número de casas por tramo.

Viendo lo vulnerable y expuesto que están las construcciones de Coquimbo ante la inundación provocada por algún evento como los evaluados en este informe, se deberían tener estándares de construcción para los sectores con potencial daño de vivienda, sin embargo solo existen legislaciones para construir edificaciones antisísmicas, pero no existe una regularización para edificaciones que están expuestas a desastres naturales, como los son los tsunamis.

Pero no solo se deben plantear soluciones para la sobrevivencia de las estructuras, sino que además se debe culturizar a la población para que tengan presente el riesgo al que están expuestos. De las series de tiempo se concluye que la mayor ola para los tres eventos se produciría a los 50 minutos de ocurrido el sismo, por lo tanto, de ocurrir un evento de estas magnitudes la evacuación del sector costero debería ser inmediata para evitar víctimas fatales.

Por ultimo las modelaciones nos permiten comprender potenciales escenarios de riesgo, información que una vez validada, se transforma en la base para reducir el riesgo de desastres, por lo tanto, se espera que un futuro se realice una modelación considerando falla finita y una diferenciación entre la materialidad de las construcciones que hoy se encuentran en la costa de Coquimbo con el fin de obtener un mapa de daño más representativo. En este estudio sólo se ha considerado la comuna de Coquimbo, no obstante La Serena es un sector que se encuentra muy cercano y que también se vería afectado por los escenarios propuestos en este informe, por ende, se debería expandir el mapa daño a este sector.

6. Referencias

- Aránguiz, R. (2014). Analysis of Tsunami Propagation in Coastal Areas - Lessons from Past Tsunamis -, (February).
- Beck, S., Barrientos, S., Kausel, E., & Reyes, M. (1998). Source characteristics of historic earthquakes along the central Chile subduction zone.
- Cheung, K. F., Wei, Y., Yamazaki, Y., & Yim, S. C. S. (2011). Modeling of 500-year tsunamis for probabilistic design of coastal infrastructure in the Pacific Northwest.
- Cisternas, M. (2014). Científicos explican dónde está la nueva brecha sísmica.
- Davidson-Arnott, R. (2010). An Introduction to Coastal Processes and Geomorphology. Davidson-Arnott.
- Gokon, H., Koshimura, S., & Matsuoka, M. (2010). Developing tsunami fragility curves for structural destruction in American Samoa. *Proceedings of the 8th International*
- Google. (2015). Google Maps.
- Google. (2016). Google Earth.
- Haiyun, W., & Xiabin, T. (2003). Relationships between moment magnitude and fault parameters: theoretical and semi-empirical relationships.
- INE. (2012). Censo 2012.
- Koshimura, S., Namegaya, Y., & Yanagisawa, H. (2009). Tsunami fragility: A new measure to identify tsunami damage. *Journal of Disaster Research*, 4(6), 479–488.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). Physics of Tsunamis, Springer Science.
- Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960.
- Métois, M., Vigny, C., & Socquet, A. (2016). Interseismic Coupling, Megathrust Earthquakes and Seismic Swarms Along the Chilean Subduction Zone
- Murao, O., & Nakazato, H. (2010). Vulnerability Functions for Buildings Based on Damage Survey Data in Sri Lanka After the 2004 Indian Ocean Tsunami. *International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE-2010) Kandy.*

- Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., & Karakaisis, G. F. (2004). Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes.
- Plataforma educativa aragonesa, H. catedu. es. (2016). ¡Todo en movimiento!, Tectónica de placas.
- SHOA. (2012). Tsunami, Las Grandes Olas.
- Soloviev, S. L., & Go, C. N. (1984). A catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean (1513-1968). *Canadian Translation of Fisheries and Aquatic Sciences*, 5078, 1–294.
- Soychile.cl. (2015). Las imágenes aéreas del antes y después del tsunami en Coquimbo.
- Suppasri, A., Koshimura, S., & Imamura, F. (2011). Developing tsunami fragility curves based on the satellite remote sensing and the numerical modeling of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Natural Hazards and Earth System Science*.
- Toro, M. (2014). Historia, Geografía y Ciencias Sociales. Edición especial para el Ministerio de Educación., 16–29.
- UNESCO. (2016). Sea Level Station Monitoring Facility (ioc-sealevelmonitoring.org).
- Universidad de Chile, F. de ciencias físicas y matemáticas. (2016). Centro Sismológico Nacional.
- Urra, L. (2015). Estimación de daños por tsunami en Iquique.
- Urra, L., & Aránguiz, R. (2015). Guía para la estimación de inundación y daño por tsunami.
- Urra, L., Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., ... Rojas, C. (2016). The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. *Pure and Applied Geophysics*.
- USGS. (2016). United States Geological Survey.
- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2010). NEOWAVE Non-hydrostatic evolution of Ocean WAVE, Version 1.1, Documentation and User Manual.

