

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil



**ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD FRENTE A TSUNAMIS DE MUROS COSTEROS Y  
ROMPEOLAS EN PLAYA CAVANCHA, IQUIQUE.**

**DIEGO ANDRÉS ESPINOZA LEIVA**

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
**INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía**

Rafael Aránguiz M.

**Profesor Informante**

Mauricio Villagrán V.

Concepción, Abril 2017

## Resumen

En la última década la zona norte de Chile ha sido azotado por tsunamis destructivos tales como Iquique en 2014 o Coquimbo en 2015, sin embargo aún existen zonas del norte que pueden fallar y generar tsunamis por lo cual es necesario evaluar medidas de mitigación.

En esta investigación se analiza la efectividad de distintas configuraciones de rompeolas como medida de mitigación frente a un tsunami generado por un evento de magnitud de momento  $M_w=9.0$  en la zona de Cavancha, Iquique. Para realizar la simulación numérica del tsunami se utilizó el software NEOWAVE. Luego de analizar los principales resultados de las simulaciones se llega a la conclusión que ninguno de los rompeolas propuestos mitiga el efecto del tsunami ni retrasa el tiempo de arribo de las ondas.

Posteriormente y sobre la base de sismos ocurridos en el último tiempo se proponen tres posibles escenarios con magnitudes de momento de 8.0; 8.2 y 8.4 respectivamente, con el fin de analizar el efecto que tendrían los rompeolas en la mitigación del tsunami generado por los eventos. Los resultados obtenidos indican que el rompeolas de escollera con abertura en el centro se comporta de mejor manera que los demás, pero no presenta una disminución significativa de la inundación.

Finalmente se presentan medidas de mitigación no-estructurales que pueden ser utilizadas en conjunto con el rompeolas para resguardar a la población.

## **Abstract**

In the last decade the northern zone of Chile has been affected by destructive tsunamis such as the 2014 Iquique and 2015 Coquimbo events. However, there are still areas in northern Chile which can rupture and generate tsunamis, subsequently, tsunami mitigation measures need to be assessed.

The present work assesses the effectiveness of different breakwaters at Cavancha, Iquique, as a mitigation measure for a tsunami generated by an event of magnitude  $M_w = 9.0$ . The NEOWAVE model was used to perform tsunami numerical simulations. The results showed that none of the proposed breakwaters delay the tsunami arrival time nor decrease the maximum tsunami inundation height. In addition, three possible scenarios of magnitude  $M_w$  8.0, 8.2 and 8.4 are analyzed. The results showed that the rubble mound breakwater with an open at the center behaves in a better way than the others, but the inundation height reduction is not really significant.

Finally, some non-structural mitigation measures are presented, and few of them are analyzed for the case of Cavancha.

*A mi abuela, este logro es tanto mío como suyo.*

*Un abrazo al cielo.*

## **Agradecimientos**

Primeramente quiero agradecerle a quien en gran medida me hizo el hombre que soy, a mi abuelita que a pesar de haber fallecido siempre me acompañó en este largo camino y que estoy más que seguro que me seguirá acompañando por siempre.

A mis padres Hugo e Ingrid quienes siempre tuvieron el consejo justo, el apoyo permanente y la paciencia suficiente para aguantarme en mis peores momentos. A mis hermanas Isidora y Catalina por todos los momentos en que reímos, peleamos y lloramos juntos. A mi tío Richard por darme trabajo durante los años de universidad.

A mi polola Loreto Mella, la mujer que se convirtió en mi motor durante estos últimos 6 años sin ella no hubiese llegado hasta esta instancia. Gracias por acompañarme en esta larga carrera, por tus cariños, tirones de oreja, risas, pie de limón y por sobre todo por entenderme en mis momentos de estrés. Este es el primer paso para lograr todos nuestros planes, fuiste importantísima en estos años de universidad.

Mención aparte se merecen mis amigos de universidad: Evans, Luis, Juanjo, Marcelo, José, Juanin, Cesar, Mauricio, Karla, Jael y Evelyn porque sin ellos el paso por la universidad no hubiese sido tan entretenido, aún en los momentos de mayor estrés nos reíamos y encontrábamos la manera de lograr los objetivos. Son personas valiosas que de seguro seguirán siendo parte de mi vida.

Otra persona que fue crucial en este camino fue la Tía Mariella, muchas gracias por el cariño, la disposición, la buena onda, las risas y por aguantar muchas veces que la fuera a molestar a última hora.

Finalmente al profesor Rafael Aránguiz por la paciencia, consejos y la confianza que depositó en mí.

## Índice de contenidos

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>12</b>
1.1	Motivación.....	12
1.2	Justificación.....	16
1.3	Objetivos .....	20
1.3.1	Objetivo general .....	20
1.3.2	Objetivos específicos.....	20
1.4	Zona de Estudio.....	21
<b>2</b>	<b>Marco Teórico</b> .....	<b>22</b>
2.1	Generalidades de los Tsunamis .....	22
2.1.1	Generación de Tsunamis .....	23
2.1.2	Propagación y llegada del Tsunamis a la costa .....	28
2.1.2.1	Parámetros hidrodinámicos del Tsunami .....	29
2.2	Generalidades de los rompeolas .....	31
2.2.1	Tipos de rompeolas .....	31
2.2.2	Rompeolas especiales contra tsunamis.....	34
<b>3</b>	<b>Métodos</b> .....	<b>36</b>
3.1	Modelo numérico .....	36
3.2	Elección de eventos Tsunamigénicos.....	36
3.2.1	Escenarios propuestos .....	37
3.3	Mallas .....	39
3.4	Rompeolas propuestos.....	41
3.4.1	Rompeolas tipo I .....	43
3.4.2	Rompeolas Tipo II.....	44
3.4.3	Rompeolas Tipo III .....	45
3.4.4	Rompeolas Tipo IV .....	46
3.4.5	Rompeolas Tipo V.....	47
<b>4</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>48</b>
4.1	Evento $M_w=9.0$ .....	48
4.1.1	Rompeolas tipo I .....	51
4.1.2	Rompeolas tipo II.....	53

4.1.3	Rompeolas tipo III.....	55
4.1.4	Rompeolas tipo IV.....	57
4.1.5	Rompeolas tipo V.....	59
4.2	Evento $M_w=8.0$ .....	61
4.2.1	Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.0.....	64
4.3	Evento $M_w=8.2$ .....	67
4.3.1	Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.2.....	70
4.4	Evento $M_w=8.4$ .....	73
4.4.1	Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.4.....	76
<b>5</b>	<b>Medidas de mitigación complementarias .....</b>	<b>79</b>
5.1	Medidas estructurales .....	79
5.1.1	Muros costeros .....	79
5.1.2	Compuertas.....	81
5.1.3	Bosque de mitigación .....	82
5.1.4	Edificaciones de evacuación vertical .....	84
5.2	Aplicación práctica a la zona de Cavanca .....	85
<b>6</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>93</b>
8.1	Anexo 1: Escenario $M_w=9.0$ modificado de Yagi et al (2014).....	93

## Índice de figuras

Figura 1.1: Relocalización de la población en la prefectura de Miyagi (Modificado de Satreps, 2016).....	15
Figura 1.2: Múltiples defensas contra tsunamis en la prefectura de Miyagi (Modificado de Satreps, 2016).....	15
Figura 1.3: Zonas con lagunas sísmicas en la zona norte (Fuente: Google Earth) .....	17
Figura 1.4: Localización de las zonas de ruptura de terremotos significativos (Fuente: Aránguiz et al, 2014).....	18
Figura 1.5: Zona de estudio (Modificado de Google Earth) .....	21
Figura 2.1: Mapa tectónico del planeta (Fuente: sitio web, usgs: <a href="https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/graphics/Fig1.jpg">https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/graphics/Fig1.jpg</a> ) .....	24
Figura 2.2: Marco Tectónico de Chile, indicando dirección y velocidad de convergencia (Modificado de CSN, 2013).....	24
Figura 2.3: Condición inicial de un Tsunami (Fuente: Davidson-Arnott, 2010).....	26
Figura 2.4: Esquema de la formulación de Okada (Yamazaki et al, 2011) .....	27
Figura 2.5: Variables hidrodinámicas relevantes en la inundación (Satreps, 2015) .....	30
Figura 2.6: Esquema rompeolas de talud (Modificado de Negro et al, 2002) .....	32
Figura 2.7: Esquema rompeolas de escollera (Fuente: Fernández, 2010).....	32
Figura 2.8: Esquema rompeolas sumergido (Fuente: MOP, 2013).....	33
Figura 2.9: Esquema rompeolas de cajón (Fuente: Fernández. 2010) .....	33
Figura 2.10: Imagen rompeolas de Kamaishi (Fuente: Google Earth) .....	34
Figura 2.11: a) Esquema del Rompeolas. b) Funcionamiento del rompeolas (Fuente: <a href="http://www.hidrojing.com/dique-retractil-de-proteccion-frente-tsunamis/">http://www.hidrojing.com/dique-retractil-de-proteccion-frente-tsunamis/</a> ) .....	35
Figura 3.1: Mallas utilizadas en la simulación.....	41
Figura 3.2: Mareógrafos virtuales dispuestos en la zona de interés.....	42
Figura 3.3: Ubicación Rompeolas tipo I en la playa de Cavanca .....	43

Figura 3.4: Ubicación rompeolas tipo II en la playa de Cavancha .....	44
Figura 3.5: Ubicación rompeolas tipo III en la playa de Cavancha .....	45
Figura 3.6: Ubicación rompeolas tipo IV en la playa de Cavancha.....	46
Figura 3.7: Ubicación rompeolas tipo V en la playa de Cavancha .....	47
Figura 4.1: Condición inicial del tsunami para evento $M_w= 9.0$ .....	48
Figura 4.2: Máxima profundidad de inundación.....	49
Figura 4.3: Serie de tiempo obtenida de los mareógrafos virtuales ubicados en Zofri y Cavancha.....	50
Figura 4.4: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo I.....	51
Figura 4.5: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo I.....	52
Figura 4.6: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo II .....	53
Figura 4.7: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo II .....	54
Figura 4.8: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo III .....	55
Figura 4.9: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo III .....	56
Figura 4.10: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo IV .....	57
Figura 4.11: Serie tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo IV .....	58
Figura 4.12: Máximas profundidades de inundación para rompeolas tipo V .....	59
Figura 4.13: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo V .....	60
Figura 4.14: Condición inicial $M_w =8.0$ .....	61
Figura 4.15: Máximas profundidades para evento $M_w =8.0$ .....	62
Figura 4.16: Serie de tiempo para evento $M_w =8.0$ .....	63
Figura 4.17: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V .....	65
Figura 4.18: Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.0 .....	66

Figura 4.19: Condición inicial para evento $M_w = 8.2$ .....	67
Figura 4.20: Mapa de inundación máxima.....	68
Figura 4.21: Serie de tiempo para evento $M_w = 8.2$ .....	69
Figura 4.22: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V .....	71
Figura 4.23: Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.2 .....	72
Figura 4.24: Condición inicial para evento $M_w = 8.4$ .....	73
Figura 4.25: Mapa con inundación máxima para evento $M_w = 8.4$ .....	74
Figura 4.26: Serie de tiempo para evento $M_w = 8.4$ .....	75
Figura 4.27: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V .....	77
Figura 4.28: Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.4 .....	78
Figura 5.1: A la izquierda: Muro en construcción, Japón (Fuente: <a href="http://www.latercera.com">www.latercera.com</a> )... ..	79
Figura 5.2: Posible emplazamiento del muro en Cavancha (Fuente Google Earth) .....	80
Figura 5.3: Funcionamiento de Compuerta (Fuente: <a href="http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2013/06/04/puertas-aleta/">http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2013/06/04/puertas-aleta/</a> ) .....	81
Figura 5.4: Bosque mitigación en Dichato (Fuente: <a href="http://lepezanzianiarquitecto.blogspot.cl/2012_11_06_archive.html">http://lepezanzianiarquitecto.blogspot.cl/2012_11_06_archive.html</a> ) .....	82
Figura 5.5: Palmeras en el paseo de la playa Cavancha (Fuente Google Earth).....	83
Figura 5.6: Edificio de evacuación vertical (Modificado de Satreps, 2016).....	84
Figura 5.7: Ubicación estacionamiento en Cavancha (Fuente Google Earth) .....	86

## Índice de tablas

Tabla 1.1: Terremotos en la zona de la laguna sísmica (Comte y Pardo, 1991).....	19
Tabla 2.1: Parámetros de la formulación de Okada (1985) .....	27
Tabla 3.1: Parámetros para evento $M_w= 8.0$ .....	38
Tabla 3.2: Parámetros para evento $M_w= 8.2$ .....	38
Tabla 3.3: Parámetros para evento $M_w= 8.4$ .....	38
Tabla 3.4: Coordenadas de los mareógrafos .....	42

# **1 Introducción**

## **1.1 Motivación**

Chile es un país que constantemente está siendo azotado por eventos sísmicos, esto porque se ubica en el llamado cinturón de fuego del pacífico. Éste se extiende por unos 40000 km desde Nueva Zelanda hasta la costa oeste de Sudamérica a través de las costas del este de Asia y Alaska y las del noreste de Norteamérica y Centroamérica.

En particular, Chile se ubica justo en la zona de interacción entre la placa de Nazca y la sudamericana, donde ésta última por ser más densa penetra por debajo de la placa de Nazca generando una zona de subducción. Alrededor de dicha zona pueden ocurrir distintos tipos de falla, como por ejemplo los sismos interplaca los cuales son responsables de la mayoría de los terremotos y posteriores tsunamis registrados en el país (Barrientos et al, 2004).

En el último tiempo el país se ha visto afectado por grandes terremotos y posteriores tsunamis, los casos más recientes son el gran terremoto de 2010, Iquique en 2014 y Coquimbo en 2015. Dichos eventos pusieron a prueba la capacidad de la población de evacuar, del gobierno para informar y de las estructuras existentes. Si bien es cierto, luego del tsunami de 2010 muchas de las políticas públicas relacionadas a desastres naturales mejoraron aún queda mucho por hacer, lo que quedó de manifiesto justamente en un simulacro de evacuación del borde costero realizado el año 2013 en la zona norte. En el informe entregado por Onemi, se evidenciaron falencias tales como: Personas detenidas en las vías de evacuación, casas sin desalojar, circulación de autos por la vías de evacuación, falta de información de la población, entre otras (Onemi, 2013).

Luego del terremoto y posterior tsunami que afectó a Chile el 2010, el gobierno ha implementado varias mejoras de sus políticas públicas de cara a enfrentar un fenómeno similar.

En la actualidad existe la norma de diseño estructural para edificaciones en áreas de riesgo de inundación por tsunami y seiche (NTM 007-2010), lo cual es un gran avance con miras a ser un país resiliente frente a las catástrofes.

Lo anteriormente señalado son medidas de mitigación frente a tsunamis que Chile ha implementado a lo largo de los años. En general se distinguen dos tipos de medidas de mitigación: estructural y no estructural (Jannah, 2014). La primera se define como cualquier obra que ayude a reducir o evita el posible impacto de la inundación producida por el tsunami, las obras de mitigación estructural se dividen a su vez en 3 grandes grupos:

**Estructuras de retención:** obras diseñadas para retener el agua para así evitar inundaciones. Esta opción apunta más a inundaciones generadas por lluvias o deshielos.

**Estructuras de protección:** obras diseñadas para proteger la zona urbana de las inundaciones. Algunos ejemplos son: muros costeros, rompeolas, diques, dunas, bosques de mitigación, etc.

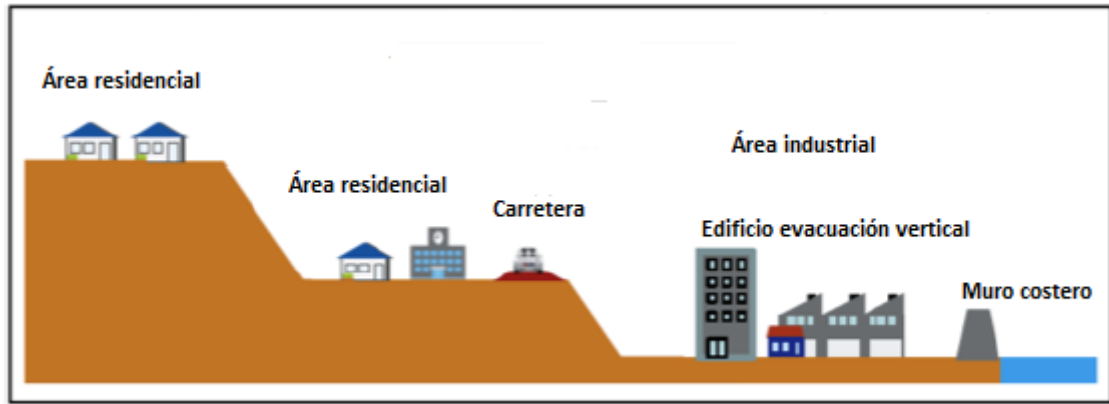
**Estructuras o sistemas de drenaje:** obras diseñadas para drenar o canalizar el agua producto de la inundación. Algunos ejemplos son: canales, compuertas, etc.

Las medidas de mitigación no estructural incluyen políticas públicas, planes de evacuación, simulacros de evacuación, normas de diseño, desarrollo de conocimiento, etc. Estas medidas apuntan a disminuir la vulnerabilidad de la población que está en zona de riesgo a partir del planeamiento y gestión.

Es importante recordar que el riesgo se define como el producto entre la amenaza y la vulnerabilidad (UNISDR, 2009), dado que la amenaza está siempre presente y no es un factor en el que se pueda intervenir como profesional, si es posible reducir la vulnerabilidad de la población.

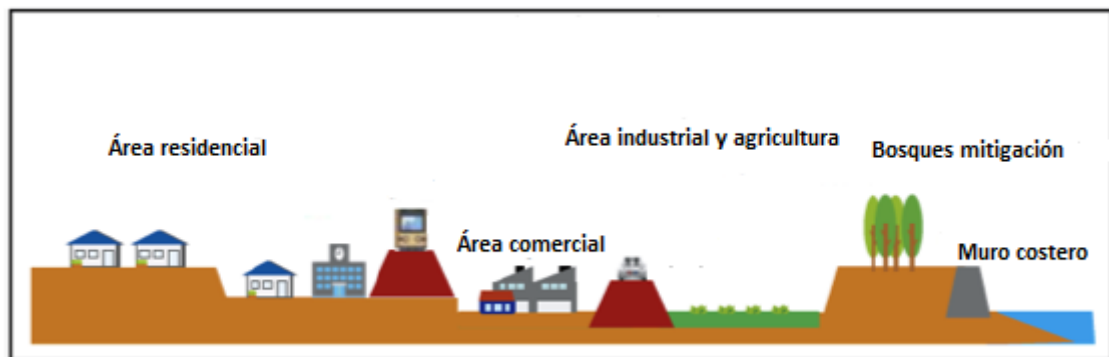
Una de las medidas adoptadas por Japón luego del terremoto y posterior tsunami de Tohoku en 2011 fue utilizar dos niveles de inundación por tsunami para diferenciar el impacto y los posibles estragos que pueden causar. Shibayama et al (2013) define como tsunamis nivel 1 a eventos que ocurren con periodos de retorno entre 50-150 años, este tipo de tsunami genera inundaciones relativamente bajas del orden de 7 a 10 metros donde se busca mediante medidas estructurales como muros, rompeolas o diques reducir el daño. Por otra parte también se definen los tsunamis nivel 2, como aquellos eventos que poseen periodos de retorno bastante largos del orden de cientos a miles de años, generando inundaciones mayores a 10 metros pudiendo llegar incluso a 20 o 30 metros. Para tsunamis nivel 2 lo primordial es la evacuación de la población puesto que ninguna medida estructural sería suficiente para contenerlo.

Otra medida con la que Japón busca mejorar su respuesta ante eventos tsunamigénicos de nivel 1 es la utilización de múltiples medidas de mitigación que apunten tanto a la mitigación del tsunami, la evacuación y reubicación de la población posterior al evento. En palabras simples se busca no solo proponer y ejecutar una medida estructural sino también a mejorar o reformular el plan de evacuación y la posterior reubicación de la población. La Figura 1.1 muestra como se pensó en primera instancia la relocalización de la comunidad costera en la prefectura de Miyagi, dejando más cerca del mar el área industrial y más alejada el área residencial e incorporando medidas estructurales para mitigar el tsunami, además de un edificio de evacuación vertical.



*Figura 1.1: Relocalización de la población en la prefectura de Miyagi (Modificado de Satreps, 2016)*

Luego que la prefectura de Miyagi se viera muy afectada por el gran terremoto del este de Japón, el plan de reconstrucción fue revisado y se incorporaron nuevas medidas estructurales para mitigar el tsunami, además de insertar un bosque de mitigación tal como se muestran en la Figura 1.2.



*Figura 1.2: Múltiples defensas contra tsunamis en la prefectura de Miyagi (Modificado de Satreps, 2016)*

## 1.2 Justificación

El 1 de abril de 2014 ocurrió un sismo de magnitud  $M_w=8.2$  con epicentro en las costas de Iquique y Pisagua en el norte de Chile, el epicentro tiene coordenadas geográficas  $19.572^\circ\text{S}$  y  $70.908^\circ\text{E}$ . Por otro lado, el 16 de Septiembre de 2015 se sucedió un evento sísmico de magnitud  $M_w=8.4$  frente a las costas de Coquimbo, a 42 km al oeste de la localidad de Canela Baja, con coordenadas epicentrales  $71.864^\circ\text{W}$  y  $31.553^\circ\text{S}$ , ambos datos según el Centro Sismológico Nacional (CSN).

Cuando una zona no presenta grandes eventos sísmicos durante un periodo prolongado de tiempo se está en presencia de una laguna sísmica. En este contexto Comte y Pardo (1991) y Giovanni et al (2002) clasifican precisamente la zona sur de Perú y norte de Chile como una laguna sísmica puesto que no se habían registrado grandes terremotos hace más de 100 años.

Es por lo anteriormente mencionado que interesa la zona de ruptura asociada al terremoto de Iquique en 2014, puesto que algunos estudios indican que no toda la región que se encuentra acoplada o tiene potencial de liberar energía se haya activado, faltando aún dos zonas por activarse, una al norte y otra al sur de la zona de ruptura. La primera se extiende desde aproximadamente Ilo, Perú hasta Cuya, Chile (Zona 1); mientras que la segunda va desde aproximadamente Punta Patache hasta Tocopilla (Zona 2) tal como se muestra en la Figura 1.3. En 2011 Chlieh et al (2011) señala que el terremoto registrado en Tocopilla solo liberó un 4% de la energía acumulada en la zona de ruptura asociada al sismo de 1877, lo cual equivale a un evento de  $M_w\sim 8.7$ .

Ambas posibles zonas de ruptura posee longitudes parecidas por lo que es esperable que se generen eventos de similar magnitud, no obstante también está la posibilidad que se activen juntas y no por separado lo que generaría un sismo mucho mayor. En el último tiempo y según datos del Centro Sismológico Nacional la actividad sísmica en la zona 1 ha sido significativamente menor en comparación con la actividad en la zona 2, lo que hace pensar que la zona 2 es más propensa a activarse con anterioridad (CSN, 2014).

Dada el área o extensión de las zonas, es que el escenario más probable sea un sismo de magnitud 8.1-8.2 en cada segmento. No obstante no se puede descartar la posibilidad que ambas zonas se activen simultáneamente y se genere un sismo de mayor magnitud (CSN, 2014).



**Figura 1.3: Zonas con lagunas sísmicas en la zona norte (Fuente: Google Earth)**

En la Figura 1.4 se muestra la localización de las zonas de ruptura de los últimos terremotos significativos en la zona norte de Chile en 1877 y en el sur del Perú en 1868.



**Figura 1.4: Localización de las zonas de ruptura de terremotos significativos (Fuente: Aránguiz et al, 2014)**

Como se aprecia en la Figura 1.4, ocurrió un evento sísmico de magnitud de momento  $M_w=8.4$  el cual en extensión abarcó cerca de la mitad del área de ruptura asociada al terremoto de 1868, por lo mismo es esperable que ocurra un evento en la zona comprendida entre Ilo y Arica tal como fue señalado en el párrafo anterior.

Además el año 2014 un terremoto con magnitud de momento de 8.2 con epicentro frente a la costa de Iquique remeció dicha ciudad (Figura 1.4), estimaciones preliminares indican que el evento fue capaz de liberar solo un 20% de la energía acumulada en la brecha sísmica (Chlieh et al, 2011), por lo cual nuevamente es esperable que se suceda otro evento de similares características que el antes mencionado.

La Tabla 1.1 muestra los sismos con magnitud  $M_w \geq 7.0$  que han ocurrido en la zona de contacto en el norte del país, estos eventos corresponden a los más relevantes que se han registrado.

**Tabla 1.1: Terremotos en la zona de la laguna sísmica (Comte y Pardo, 1991)**

<b>Fecha</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Magnitud</b>
<b>26-04-1905</b>	21.0	70.0	7.0
<b>30-08-1906</b>	21.0	70.0	7.2
<b>26-12-1906</b>	18.0	71.0	7.0
<b>15-09-1911</b>	20.0	72.0	7.3
<b>20-11-1928</b>	22.5	70.5	7.1
<b>23-02-1933</b>	20.0	71.0	7.6
<b>19-04-1945</b>	19.5	70.0	7.2
<b>29-07-1947</b>	23.5	71.0	7.0
<b>08-01-1956</b>	19.0	70.0	7.1
<b>21-12-1967</b>	21.9	70.1	7.3
<b>12-04-1988</b>	17.3	72.4	7.0

A los sismos mostrados en la tabla anterior se suman los ocurridos en Tocopilla el año 2007 que alcanzó una magnitud de  $M_w=7.7$ , Iquique el 2014 que tuvo una magnitud de momento de 8.2 y finalmente el terremoto de Coquimbo el 2015 que registró una magnitud de 8.4. Todas las magnitudes previamente señaladas fueron extraídas de la página del centro sismológico nacional

Por todo lo anteriormente señalado es que interesa analizar si las medidas de mitigación estructural propuestas son efectivas para mitigar el efecto de un tsunami generado por terremotos de gran magnitud en la zona norte, además de analizar si las medidas son factibles de ser implementadas.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo es analizar la efectividad de implementar medidas de mitigación estructurales frente a tsunamis generados por eventos sísmicos propuestos de magnitud de momento ( $M_w$ ) mayores o iguales a 8.0 en la zona de Cavancha, Iquique.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Dentro de los objetivos específicos de este estudio están:

- Estudiar la sismicidad de la zona norte de Chile y proponer posibles eventos sísmicos que podrían desencadenar un Tsunami.
- Simular numéricamente los escenarios propuestos con el fin de obtener las zonas que se ven más afectadas y analizar el efecto que tiene la medida de mitigación frente al tsunami.
- Finalmente estudiar y proponer medidas de mitigación anexas a los rompeolas de manera de maximizar la eficiencia de los rompeolas.

#### 1.4 Zona de Estudio

La ciudad de Iquique se encuentra en el norte de Chile ( $20^{\circ}13'13''$  S), específicamente en la primera región de Tarapacá (Figura 1.5). Iquique se caracteriza por ser un gran atractivo turístico del país, es por esto que año tras año recibe a muchos visitantes nacionales e internacionales. Dentro de los atractivos turísticos más destacables se encuentran la ZOFRI y los muchos balnearios que existen en la ciudad, uno de ellos es la playa de Cavancha que se encuentra en pleno centro de Iquique y que es la zona de interés de este trabajo.



*Figura 1.5: Zona de estudio (Modificado de Google Earth)*

## **2 Marco Teórico**

### **2.1 Generalidades de los Tsunamis**

Según Unesco (2013) un tsunami se puede definir como: “Serie de ondas marinas de longitud y período sumamente largos de ocurrencia natural que resulta de una perturbación rápida y a gran escala de una masa de agua, causada entre otros, por terremotos interplaca asociados a zonas de subducción, movimientos de masa, erupciones volcánicas o impacto de meteoritos.”

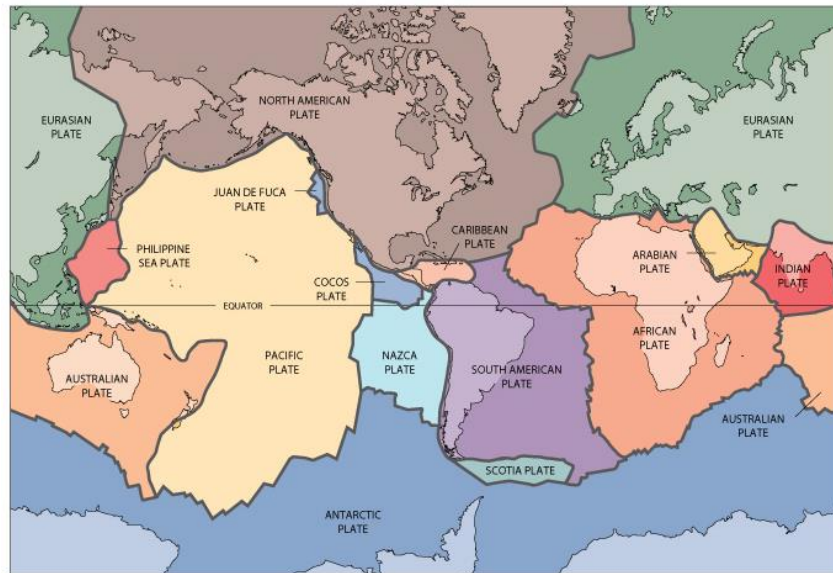
Muchos países del mundo han sido azotados por terremotos de gran magnitud que vienen acompañados por tsunamis que maximizan los daños ocasionados por el evento sísmico. Por ejemplo en 1960 ocurrió un terremoto de  $M_w=9.5$  el cual ocasionó en conjunto con el tsunami un total de aproximadamente 2000 muertos, 3000 heridos, 2 millones de damnificados y 550 millones de dólares en daños. Fue tal la magnitud del terremoto y posterior tsunami que las ondas llegaron a otras zonas costeras del mundo como: Hawái, Japón, Rusia, Nueva Zelanda y Australia (Gobierno de Chile, 2011). Otro ejemplo a considerar es el tsunami generado en el océano indico por un terremoto de magnitud  $M_w=9.1$  el año 2004, el cual es considerado el segundo de mayor magnitud por debajo del de Valdivia en 1960. Dicho tsunami generó grandes daños y dejó un saldo de 108100 personas muertas, 127700 personas desaparecidas y 426800 damnificados situando al terremoto y posterior tsunami de Sumatra como uno de los más destructivos (USGS, 2014).

Un caso aún más reciente ocurrió en Japón en 2011, donde un sismo de magnitud  $M_w=9.1$  generó un tsunami que se percibió no solo en Japón sino que en otras partes del mundo tales como: Nueva Zelanda, Australia, Rusia, Hawái, Perú, Ecuador y Chile entre otras. El tsunami generado dejó 15893 muertos, 2556 personas desaparecidas y 6512 heridos según la agencia de policía nacional de Japón, por otro lado las pérdidas monetarias asociadas a la catástrofe corresponde a aproximadamente un 3%-5% del PIB de Japón (JNPA, 2011).

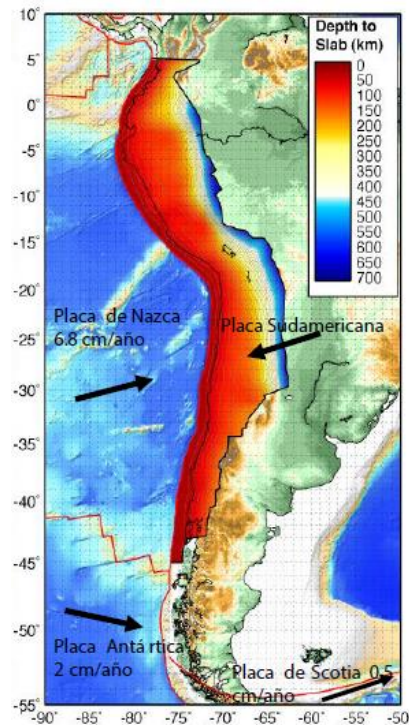
Dado que han ocurrido gran cantidad de eventos en el mundo es que se necesita comprender mejor como se generan y cuáles son los procesos físicos relevantes que generan un tsunami, lo anterior es lo que aborda este capítulo.

### **2.1.1 Generación de Tsunamis**

La teoría de tectónica de placas considera que la tierra está conformada por una serie de placas (Figura 2.1) que son capaces de desplazarse independiente una de otra, estos desplazamientos traen consigo una acumulación de energía que pasado algunos o muchos años es liberada abruptamente generando fracturas de la corteza terrestre. Existen distintos tipos de sismos como los interplaca, outer-rise, intraplaca-oceánica e intraplaca-continental. Chile en particular está ubicado en una zona interplaca, específicamente sobre la placa Sudamericana, cercano al margen convergente que la divide de la placa de Nazca ubicada al oeste. La zona particular donde se encuentra Chile se conoce como zona de subducción, donde la placa oceánica de Nazca, más densa que la placa Sudamericana, penetra bajo el continente generando la zona antes mencionada. La velocidad de convergencia de dichas placas es de aproximadamente 6.8 cm/año (Figura 2.2).



**Figura 2.1: Mapa tectónico del planeta (Fuente: sitio web, usgs: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/graphics/fig1.jpg>)**



**Figura 2.2: Marco Tectónico de Chile, indicando dirección y velocidad de convergencia (Modificado de CSN, 2013)**

En un principio la magnitud de los terremotos se medía mediante la escala de Richter que fue creada en 1935 y es usada hasta el día de hoy, sin embargo la desventaja de usar esta escala para describir la magnitud de un terremoto es que se satura, es decir, para grandes magnitudes la escala de Richter no describe de manera óptima el evento. Es por esta desventaja que hoy en día se utiliza la escala de magnitud de momento que no se satura y permite describir eficazmente los eventos ya sean muy grandes o muy pequeños (Tarbuck y Lutgens, 2011). La escala de magnitud de momento se fundamenta en el concepto del momento sísmico ( $M_0$ ). Dicho concepto representa la cantidad de energía liberada durante un evento y se define como:

$$M_0 = \mu DA$$

Donde  $\mu$  es la magnitud del módulo de deformación de la corteza terrestre (30 GPa generalmente), D es el deslizamiento medio sobre la zona de ruptura y A es el área de la zona de ruptura.

Finalmente, la escala de magnitud de momento  $M_w$  queda definida por la siguiente relación:

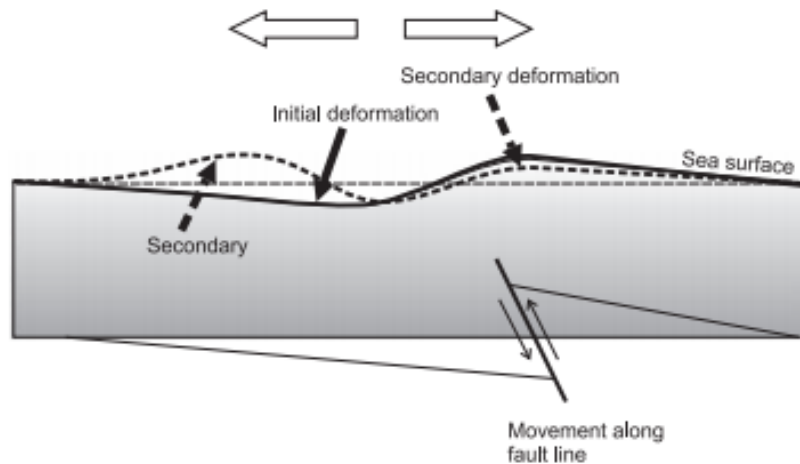
$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - \alpha$$

Donde  $\alpha$  es una constante que toma el valor de 6 si  $M_0$  es expresado en N-m o 10.7 si es expresado en dina-cm.

Ya se habló en párrafos anteriores que los tsunamis de interés en este estudio son los producidos por terremotos de gran magnitud, sin embargo no todos los eventos sísmicos de gran magnitud generan eventos tsunamigénicos. La forma en que un terremoto genera un tsunami tiene que ver con la deformación Cosísmica que ocurre en el lecho marino, esta deformación genera una excitación de la columna de agua producto de la transmisión de energía. Por lo cual queda de manifiesto que, para generar un tsunami el terremoto debe tener parte de su zona de ruptura bajo la superficie del océano y debe presentar un deslizamiento vertical suficiente (Satreps, 2015).

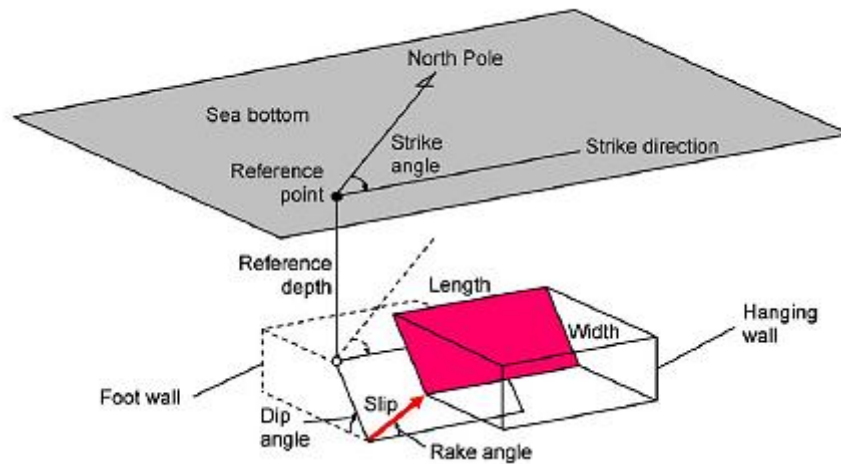
Existen muchos métodos para determinar la deformación Cosísmica, unos se basan en la teoría de dislocaciones mediante soluciones analíticas tales como: Okada (1985), Mansinha and Smylie (1971) y otros utilizan la geodesia, ya sea con mediciones satelitales o de GPS. En el caso de esta investigación se utilizó la formulación de Okada para estimar dicha deformación.

La Figura 2.3 muestra la condición inicial de un tsunami, que corresponde a la deformación inicial de la superficie del agua y que se considera igual al desplazamiento vertical del fondo marino producto de la liberación brusca y rápida de energía.



**Figura 2.3: Condición inicial de un Tsunami (Fuente: Davidson-Arnott, 2010)**

Para estimar la deformación inicial se utiliza la formulación de Okada (1985), quien plantea una solución analítica para el problema estacionario de la teoría de la elasticidad. Esta considera una zona de ruptura con parámetros de falla asociados a dicha zona. Los parámetros requeridos en la formulación de Okada (Tabla 2.1), además de la magnitud de momento del sismo y su magnitud son:



**Figura 2.4: Esquema de la formulación de Okada (Yamazaki et al, 2011)**

**Tabla 2.1: Parámetros de la formulación de Okada (1985)**

Slip (D)	Magnitud del desplazamiento relativo del plano de falla
Width (W)	Ancho de la zona de ruptura
Length (L)	Largo de la zona de ruptura
Dip angle ( $\lambda$ )	Ángulo de ruptura con respecto al plano vertical
Rake angle ( $\delta$ )	Ángulo de deslizamiento de la falla
Strike angle ( $\theta$ )	Ángulo de la falla con respecto al norte y en sentido horario
Reference Depth (H)	Profundidad focal
Reference Point	Coordenadas del punto inferior izquierdo del plano de falla

Dentro de los parámetros necesarios para utilizar la formulación de Okada (1985) aparecen el ancho y largo de la zona de ruptura, los cuales pueden ser determinados en función de la magnitud del evento sísmico mediante las leyes de escalamiento propuestas por Papazachos et al (2004). Papazachos definió una serie de leyes de escalamiento para distintas partes del mundo, para el caso de la zona de subducción entre la placa de Nazca y Sudamericana, las ecuaciones propuestas son:

$$\log L = 0.55M_w - 2.19$$

$$\log W = 0.31M_w - 0.63$$

### 2.1.2 Propagación y llegada del Tsunamis a la costa

Los tsunamis son una serie de ondas de gran longitud generadas por un desplazamiento abrupto de una gran masa de agua. Debido a que poseen una gran longitud de onda, también poseen grandes períodos de 5 minutos o más. Es por las características antes mencionadas que los tsunamis se comportan como ondas en aguas someras y por lo tanto se ven afectados por el fondo marino y la geomorfología costera en general sufriendo cambios en términos de altura, velocidad, cambios de dirección.

Dado que los tsunamis se comportan como ondas en aguas someras, la celeridad del mismo puede ser aproximada mediante la expresión:

$$C = \sqrt{gh}$$

Donde  $g$  corresponde a la aceleración de gravedad y  $h$  es la profundidad a la cual se está estimando la celeridad de la onda. Si se considera que la profundidad promedio del fondo marino en el océano pacífico es aproximadamente 4 km y la aceleración de gravedad en la tierra es de  $9.81 \text{ m/s}^2$ , la celeridad del tsunami en el océano pacífico sería del orden de 713 km/h; para tener una idea un avión comercial viaja aproximadamente a 700 km/h en velocidad crucero.

Como se aprecia en la ecuación de celeridad de la onda, ésta es directamente proporcional a la profundidad, cuando la onda se acerca hacia aguas someras (menor profundidad) pierde velocidad lo cual implica una disminución de la energía cinética, para compensar dicha disminución el tsunami crece en altura y por consiguiente aumenta la energía potencial del mismo. A si mismo los conceptos de refracción, difracción, asomeramiento y reflexión

comienzan a tener sentido puesto que la onda va “sintiendo” el fondo marino. A continuación se definen cada uno de los conceptos recién nombrados.

**Reflexión:** Este fenómeno ocurre cuando la onda choca contra un obstáculo y se refleja con el mismo ángulo de incidencia.

**Refracción:** Cambio de dirección de la onda debido a la batimetría.

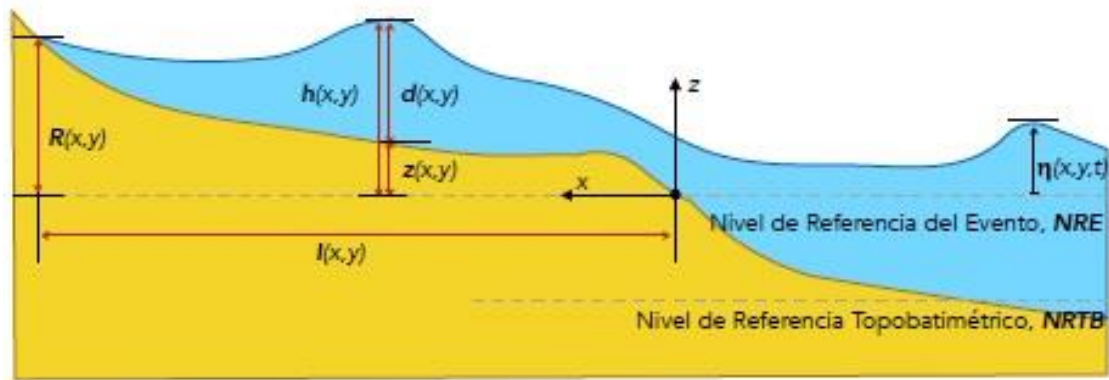
**Difracción:** Dispersión de energía debido a obstáculos, apareciendo pequeños sistemas de ondas.

**Asomeramiento:** También conocido como *Shoaling*, corresponde al aumento de altura de la onda a medida que se acerca a la costa.

Los conceptos antes definidos son importantes puesto que de ellos dependerá en gran medida como el tsunami llegará a la costa, en términos de velocidad, altura de inundación, tiempo de arribo, etc.

### **2.1.2.1 Parámetros hidrodinámicos del Tsunami**

Una vez que la onda llega a aguas someras y pasa por todos o algunos de los procesos físicos mencionados en el párrafo anterior, comienza la inundación de la zona costera. Es por esto que se deben tener en consideración ciertos conceptos claves para entender el proceso de inundación de la costa, la Figura 2.5 muestra algunas variables hidrodinámicas relevantes en la inundación y luego se definen ciertos conceptos de interés para esta investigación.



**Figura 2.5: Variables hidrodinámicas relevantes en la inundación (Satreps, 2015)**

**Altura de Inundación,  $h(x,y)$ :** Elevación alcanzada por el agua del mar en el lado tierra medida respecto a un Datum dado por el nivel de referencia del evento (NRE) en una distancia de inundación específica. La altura de inundación es la suma de la profundidad de inundación y la cota de elevación del terreno local.

**Profundidad de Inundación,  $d(x,y)$ :** También llamada profundidad de flujo, es la profundidad del agua del tsunami sobre la cota del terreno medido en un sitio específico.

**Run-up,  $R(x,y)$ :** Diferencia entre la cota de terreno en el punto de máxima inundación horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia del tsunami NRE.

**Tiempo de arribo del tsunami:** Tiempo de llegada del primer tren de ondas a un determinado sitio. Corresponde al tiempo transcurrido entre el inicio del sismo y el comienzo de la desnivelación  $\eta(x,y,t)$  descontando la marea.

## 2.2 Generalidades de los rompeolas

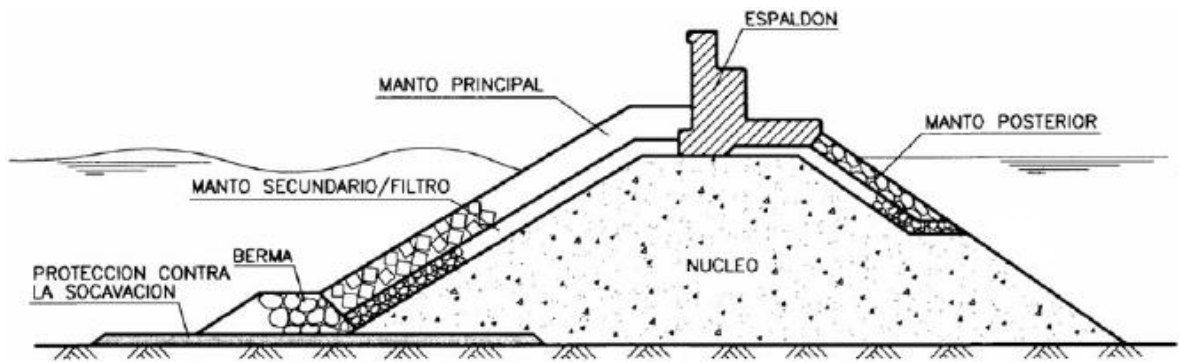
Los rompeolas son estructuras que se ubican generalmente en la boca de las bahías, su principal función es proteger la costa de la acción del oleaje. En el último tiempo se han estado construyendo rompeolas especialmente diseñados para contrarrestar los efectos destructores de los Tsunamis, los cuales son considerablemente más robustos que los rompeolas comunes. Luego del terremoto y tsunami de 1960 que ocurrió en Chile, Japón comenzó con los estudios para analizar la efectividad de los rompeolas en la mitigación del tsunami, fue así como en 1963 se comenzó con las obras para construir un rompeolas en el puerto de Ofunato en la costa de Sanriku (Murata et al, 2010).

### 2.2.1 Tipos de rompeolas

En este subcapítulo se ilustran y describen los tipos de rompeolas existente, generalmente empleados como estructuras de abrigo costero.

Existen distintos tipos de rompeolas, el MOP en 2013 publica un documento que lleva por nombre “Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras” en él se presenta una clasificación de obras de abrigo costero y en particular de los rompeolas. En resumen los rompeolas se pueden clasificar en:

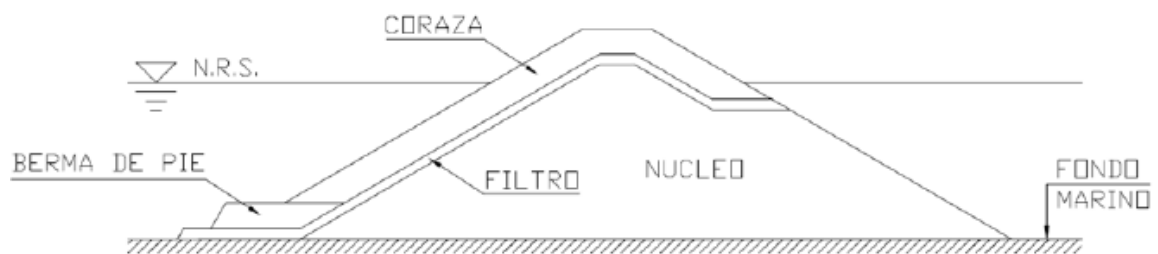
**Rompeolas de talud:** El cuerpo central consta de una secuencia de mantos, conformando una transición entre el núcleo de material de cantera y el manto principal. Este tipo de rompeolas puede poseer o no una superestructura en su porte superior (Espaldón). La Figura 2.6 muestra el esquema típico de este rompeolas.



**Figura 2.6:** Esquema rompeolas de talud (Modificado de Negro et al, 2002)

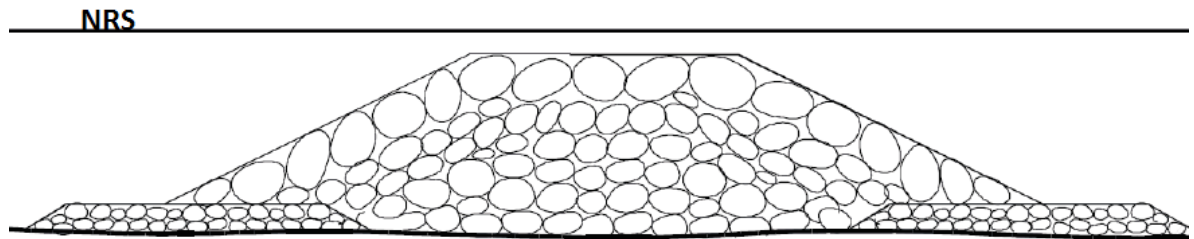
**Rompeolas de escollera:** Son estructuras construidas por capas, mediante elementos de diferentes granulometrías y materiales. El tamaño de los materiales es creciente desde el interior del rompeolas hacia afuera, generando una especie de filtro para evitar la pérdida de material desde el núcleo (Figura 2.7).

En la actualidad los elementos de mayor tamaño que componen la coraza, son piezas de hormigón en masa de diferentes formas (cubos, dolos, tetrápodos, core-loc, etc.). Otra característica importante de este tipo de rompeolas es que poseen una berma de pie, con el fin de establecer un equilibrio entre la pendiente del rompeolas y la acción del oleaje.



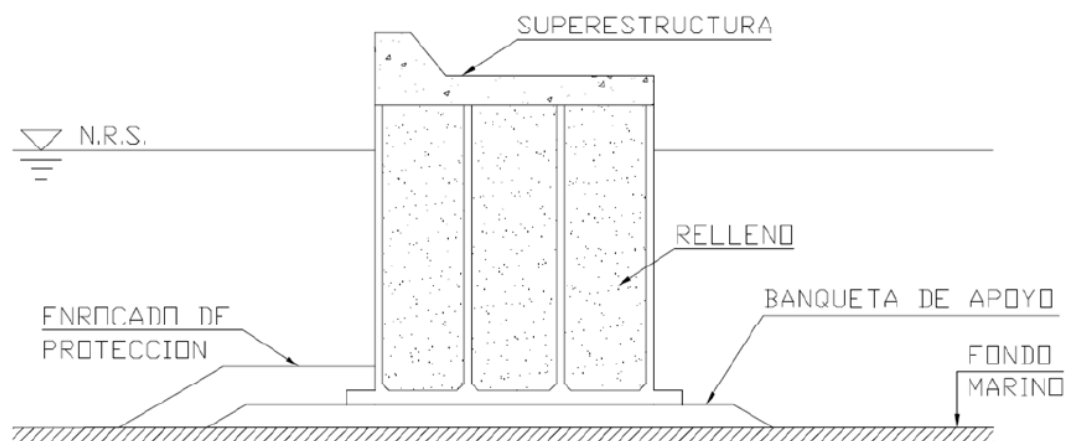
**Figura 2.7:** Esquema rompeolas de escollera (Fuente: Fernández, 2010)

**Rompeolas sumergido:** Se considera un rompeolas como sumergido cuando su cota de coronación se encuentra por debajo del nivel de reducción de sonda (N.R.S). Este tipo de rompeolas son construidos con el fin de reducir la acción del oleaje, forzando a éste romper sobre el rompeolas. Su composición es similar al rompeolas de escollera, tal como lo muestra la Figura 2.8



*Figura 2.8: Esquema rompeolas sumergido (Fuente: MOP, 2013)*

**Rompeolas de cajones de hormigón:** Las ventajas de este tipo de rompeolas son que para una misma profundidad, requieren mucho menos material que los rompeolas de talud, y además se pueden prefabricar. Los cajones se trasladan flotando al lugar de colocación y se hunden, para luego rellenarlos con áridos, de forma que constituyan una estructura rígida. La figura xxx muestra un esquema de una sección de este tipo de rompeolas.



*Figura 2.9: Esquema rompeolas de cajón (Fuente: Fernández, 2010)*

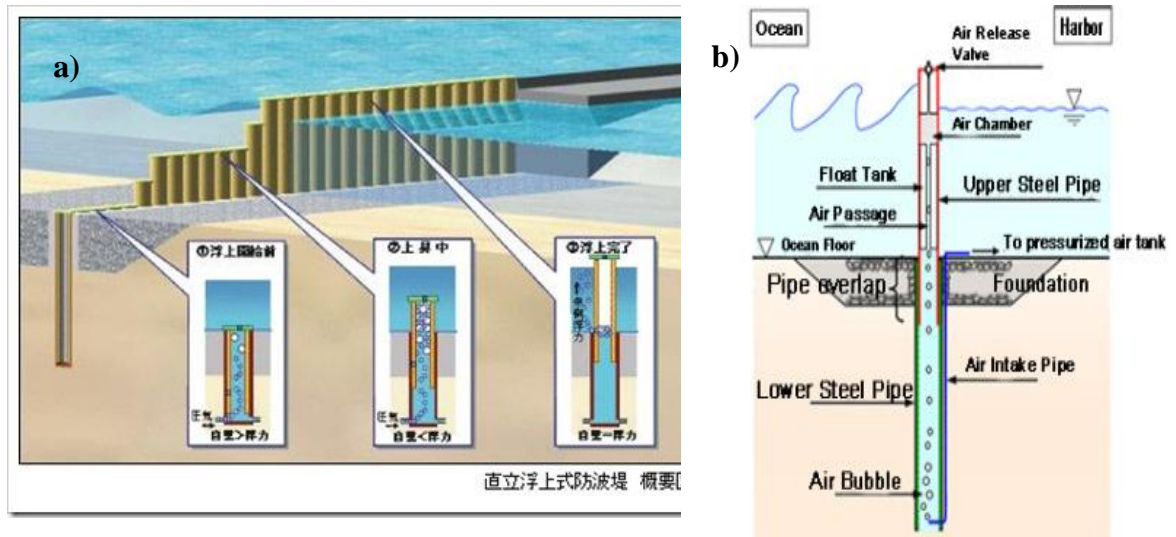
### 2.2.2 Rompeolas especiales contra tsunamis

Uno de los más importantes rompeolas contra tsunamis construidos en la actualidad es el de Kamaishi, Japón (Figura 2.10); con un largo aproximado de 1960 m de largo y 63 m de profundidad siendo el más profundo del mundo (Tanimoto y Goda, 1992). Este rompeolas sufrió graves daños luego del tsunami que azotó a Japón en 2011 por lo cual fue analizado por Sozdinler et al (2015) quien simuló el tsunami para analizar las causas de la falla de este rompeolas, concluyendo que la diferencia de presiones hidrostáticas entre el frente y el sotavento del rompeolas era demasiado alta. Por su parte Arikawa et al (2013) analizó los mecanismos de falla del rompeolas pero mediante modelos a escala, obteniendo conclusiones similares a Sozdinler.



*Figura 2.10: Imagen rompeolas de Kamaishi (Fuente: Google Earth)*

Otro caso interesante de conocer es el nuevo dique o rompeolas artificial que se está implementando en la península de Wakayama, alrededor de la bocana del puerto de Shimotsu en Japón. La principal característica de este rompeolas es que no obstaculiza el transporte marítimo y la estética del mar, esto porque posee un sistema de barreras que están hundidas y solo salen a flote si hay una alerta de tsunami. Las barreras tienen una altura de 13 m desde el fondo, por lo cual cuando son accionadas se pueden elevar hasta 7.5 m sobre el nivel del mar en no más de 10 minutos.



**Figura 2.11:** a) Esquema del Rompeolas. b) Funcionamiento del rompeolas (Fuente: <http://www.hidrojing.com/dique-retractil-de-proteccion-frente-tsunamis/>)

### **3 Métodos**

#### **3.1 Modelo numérico**

El modelo que se utilizó en esta investigación fue NEOWAVE (Non-Hydrostatic Evolution of Ocean WAVEs) el cual fue creado por Yoshiki Yamazaki para el análisis numérico de Tsunamis (Yamazaki et al., 2009, 2011). Este modelo bidimensional resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras mediante un esquema semi-implícito de diferencias finitas en dos direcciones, con la particularidad que se pueden utilizar mallas anidadas de distintas resoluciones, ya sea en coordenadas esféricas como cartesianas. Otro punto fuerte de este modelo es que considera la componente no hidrostática de presión.

NEOWAVE es derivado de las ecuaciones de Navier-Stoke incompresibles y de la ecuación de continuidad, considerando en ambos casos efectos de no linealidad, viscosidad del fluido, presión hidrostática y como ya se mencionó presión no hidrostática.

La condición inicial para este modelo de Tsunami es la deformación inicial de la superficie del agua que se asume igual a la deformación del fondo oceánico, la cual se obtuvo a partir de la formulación de Okada (Figura 2.4).

#### **3.2 Elección de eventos Tsunamigénicos**

Para elegir el evento que desencadenará el Tsunami se pueden considerar dos líneas o fuentes de información. Una de ellas implica pensar que se repetirán eventos pasados de gran magnitud, mientras que la otra dice relación con el análisis histórico de terremotos que han generado eventos de Tsunami y en base a ello proponer escenarios futuros probables con el fin de evaluar el tsunami que generarían.

El proponer escenarios no es trabajo solo de una persona, se requiere un equipo multidisciplinario de profesionales capacitados y con vasta experiencia para evaluar las posibles rupturas y los Tsunamis que se generarían. En general el equipo necesita de ingenieros, geólogos y geógrafos entre otros.

### 3.2.1 Escenarios propuestos

Chlieh et al (2011) estudia el potencial sísmico para la zona norte de Chile, trabajo con el cual Yagi et al (2014) propone un escenario con un distribución de slip que responde al supuesto que fallaría un área equivalente al terremoto de 1877, esto sumado a la porción sur de la zona de ruptura de 1868 (Ver Figura 1.4). Por esto es que el evento alcanza una magnitud de  $M_w=8.81$ .

Generalmente los escenarios propuesto por distintos profesionales se basan en períodos de retorno de fallas o rupturas ocurridas hace algunos cientos de años y la actualidad, dejando fuera eventos que eventualmente ocurrieron hace miles de años. Por lo anterior es que se propone modificar el escenario de Yagi aumentando al doble los desplazamientos pero manteniendo el área de ruptura, lo que resulta en un evento extremo de magnitud  $M_w=9.0$ . Para mayor detalle de este escenario revisar el Anexo 1.

El evento antes mencionado corresponde a un modelo de falla finita, los cuales consideran varios segmentos o subfallas independientes entre sí, es decir, los parámetros sísmicos asociados pueden o no variar entre cada una de las subfallas. El evento considera 335 subfallas, cada una de ellas con un área de  $20 \times 20 \text{ km}^2$ , un strike entre  $336^\circ$  y  $2^\circ$  dependiendo de la ubicación de la falla, ángulos dip y rake de  $20^\circ$  y  $90^\circ$  respectivamente.

Por otra parte, el autor propone 3 escenarios más en base a lo presentado en el capítulo 1.2, bajo dos supuestos: el primero toma en consideración que la Zona 2 es la que más posibilidades tiene de activarse versus la Zona 1, mientras que el segundo supuesto toma en cuenta la extensión de la posible zona de ruptura.

Ambas consideraciones arrojan como escenario más probable, sismos de magnitud del orden de 8.0 a 8.4. Los escenarios propuestos son modelos de falla plana uniforme y se presentan en las tablas siguientes:

*Tabla 3.1: Parámetros para evento  $M_w= 8.0$*

<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Largo (km)</b>	<b>Ancho (km)</b>	<b>Slip (m)</b>	<b>Strike</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>
-22.242	-71.335	162	71	2.9	359	20	90

*Tabla 3.2: Parámetros para evento  $M_w= 8.2$*

<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Largo (km)</b>	<b>Ancho (km)</b>	<b>Slip (m)</b>	<b>Strike</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>
-22.655	-71.408	209	82	3.89	359	20	90

*Tabla 3.3: Parámetros para evento  $M_w= 8.4$*

<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Largo (km)</b>	<b>Ancho (km)</b>	<b>Slip (m)</b>	<b>Strike</b>	<b>Dip</b>	<b>Rake</b>
-23.190	-71.405	270	95	5.23	2	20	90

Finalmente se evalúan estos cuatro escenarios para analizar la inundación que cada uno genera y así evaluar la efectividad de las medidas de mitigación propuestas.

### 3.3 Mallas

Las estructuras como rompeolas y muros así como canales y ríos pueden generar interacciones complejas con la onda de tsunami, por lo que es deseable contar con la mayor resolución posible en sus cercanías. Por otra parte, una gran resolución en zonas profundas con poca variación supone un exceso de nodos de cómputo que afectan el rendimiento del modelo (Satreps, 2015).

NEOWAVE es un modelo capaz de utilizar mallas anidadas las cuales van aumentando su resolución espacial en función de la zona que interesa estudiar, siempre teniendo en cuenta que mallas con una gran resolución aumentan significativamente el tiempo de simulación y los recursos computacionales. Por lo anteriormente señalado es que se recomienda utilizar una malla con resolución de 30 m, esto debe ser acompañado con una buena calidad de datos topo-batimétricos.

Otro punto a considerar al momento de elegir las mallas es el tiempo de integración ( $\Delta t$ ), el cual debe estar definido en función del número de Courant. Este número adimensional indica la estabilidad numérica del modelo y se define como:

$$\frac{\sqrt{g \cdot h_{max}} \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq C_{max}$$

Donde:

$\Delta x$ : Resolución de la malla

$h_{max}$ : Profundidad máxima en la malla

$g$ : Aceleración de gravedad

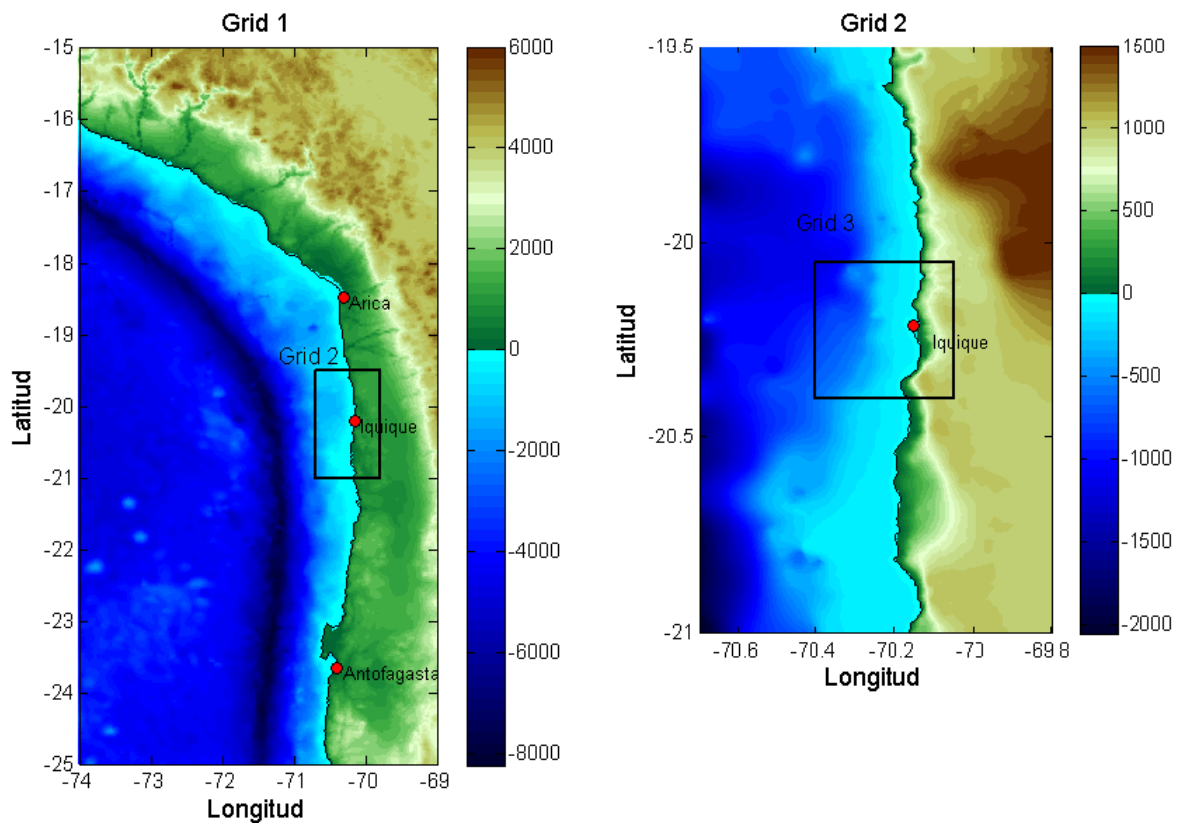
En general para asegurar una estabilidad numérica de un modelo el número de Courant debe ser siempre menor a 1, sin embargo se recomienda que al modelar con NEOWAVE los valores vayan entre 0.1-0.3.

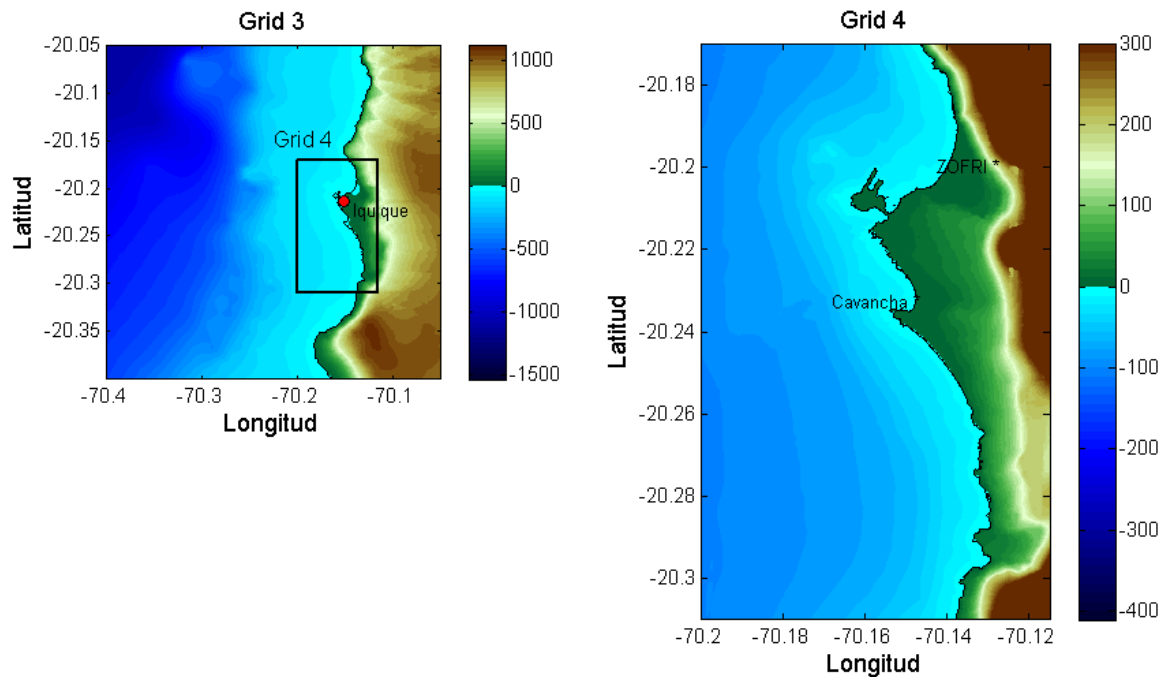
Como se aprecia en la ecuación habrá tantos número de Courant como mallas se utilicen en la simulación, por lo cual el tiempo de integración (constante para todas las mallas) será el mínimo de los valores, tal que se cumpla la condición que  $C_{max} \leq 0.3$ .

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente señalado se eligieron las mallas (Figura 1.5) para realizar las simulaciones, se optó por utilizar cuatro mallas anidadas (Grid 1, Grid 2, Grid 3 y Grid 4) con resoluciones de 3.7 km, 900 m, 180 m y 30 m respectivamente.

Por otro lado el menor tiempo de integración  $\Delta t$  fue de 0.125 seg que corresponde a la Grid 4 la cual posee la mayor resolución espacial.

Como parte de la elección de las mallas también se definió el coeficiente de Manning para la simulación el cual es constante e igual a 0.025 tanto para el fondo marino como para la zona seca (Urrea, 2015).





*Figura 3.1: Mallas utilizadas en la simulación*

### 3.4 Rompeolas propuestos

En primera instancia se propusieron rompeolas para mitigar el efecto que generaría el Tsunami asociado al evento sísmico con magnitud momento  $M_w = 9.0$  que fue mencionado en el capítulo 3.2.1. Para poder modificar la topobatimetría e incluir el rompeolas en la malla se utilizó el software Surfer 13.3.

Posteriormente y en base a los resultados obtenidos por todos los rompeolas para el evento de  $M_w = 9.0$ , se eligieron dos configuraciones y se probaron para el resto de los eventos propuestos en el capítulo 3.2.1.

Para evaluar los efectos de mitigación de cada uno de los rompeolas se dispusieron mareógrafos virtuales en la playa de Cavancha y en la zona de Zofri para obtener series de tiempo para cada caso y comparar los efectos de cada configuración. (Ver Figura 3.2). Las coordenadas de cada mareógrafo se muestran en la Tabla 3.4



*Figura 3.2: Mareógrafos virtuales dispuestos en la zona de interés*

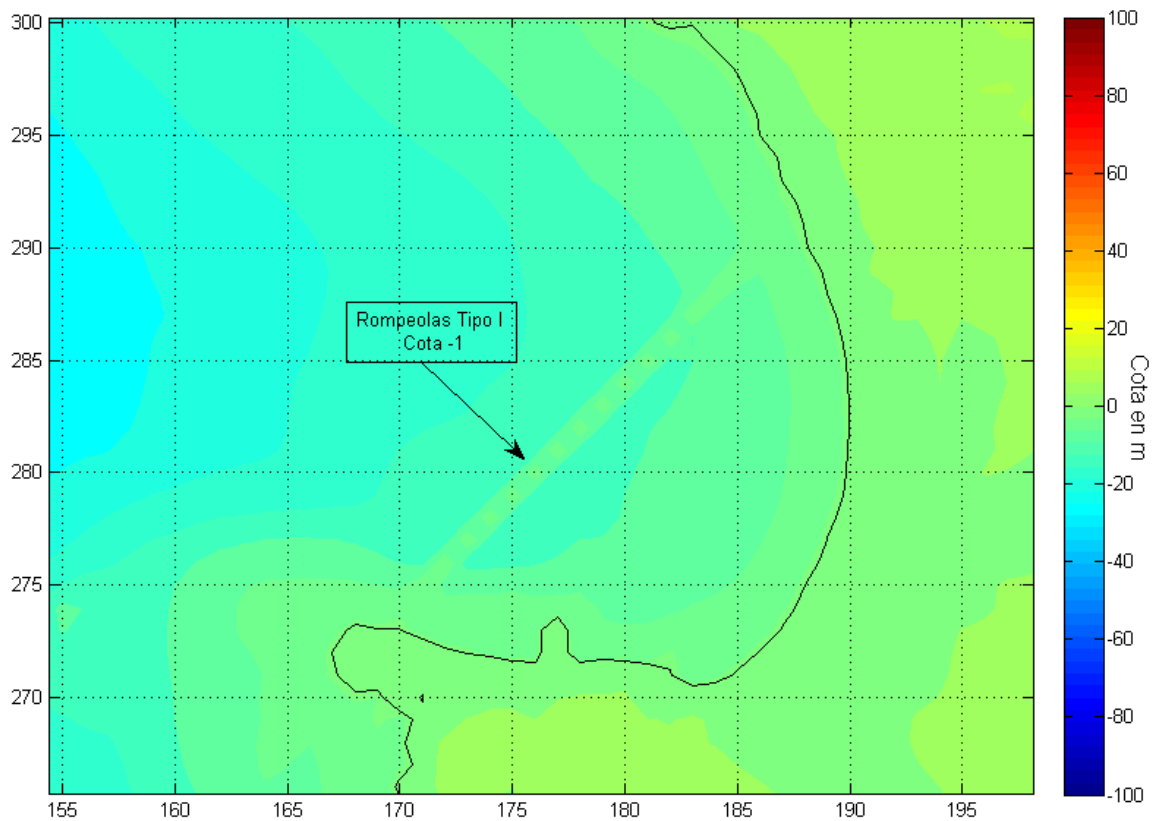
*Tabla 3.4: Coordenadas de los mareógrafos*

<b>Mareógrafo</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
<b>Cavanca</b>	<b>-20.2312°</b>	<b>-70.1490°</b>
<b>Zofri</b>	<b>-20.2000°</b>	<b>-70.1424°</b>

### 3.4.1 Rompeolas tipo I

El rompeolas tipo I, es uno del tipo sumergido y considera una altura de 1 m bajo el nivel medio del mar (NMM) protegiendo totalmente la zona de la playa de Cavancha. Como ya se mencionó el rompeolas está ubicado en una profundidad promedio de 10 m.

La ubicación del rompeolas en la bahía se muestra en la Figura 3.3.

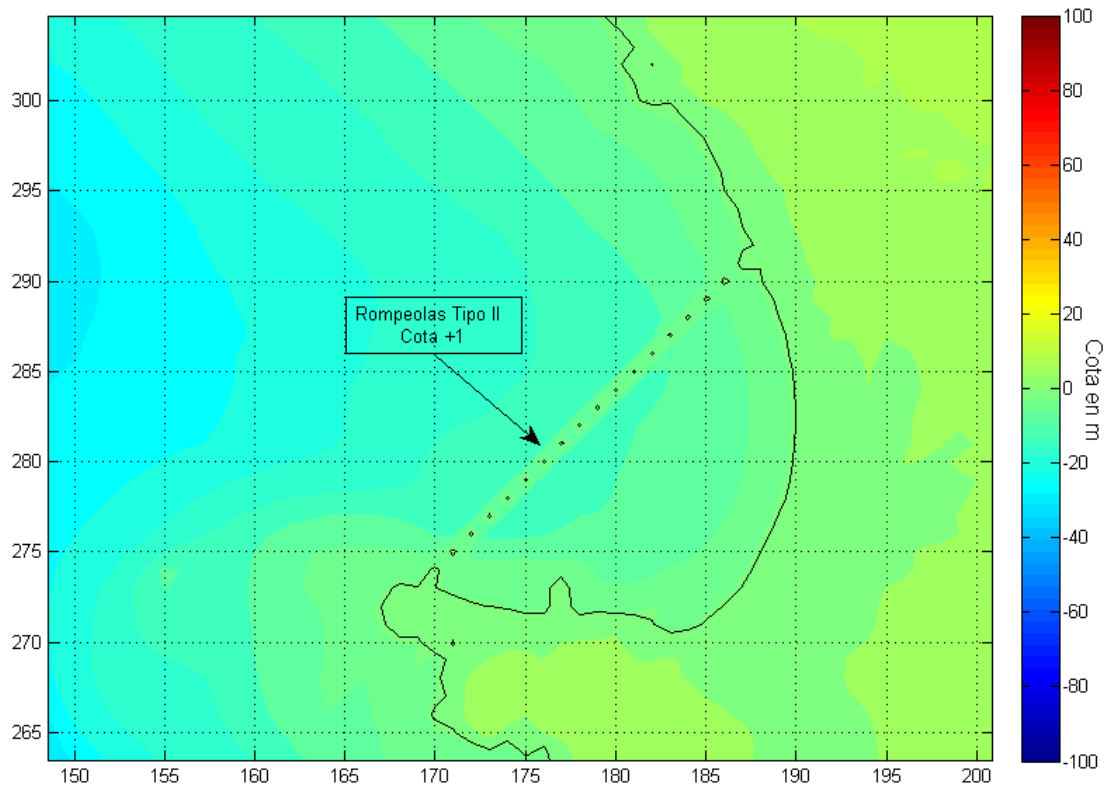


*Figura 3.3: Ubicación Rompeolas tipo I en la playa de Cavancha*

### 3.4.2 Rompeolas Tipo II

El rompeolas tipo II considera una altura de 1 m sobre el nivel medio del mar (NMM) protegiendo en su totalidad la zona de la playa de Cavancha. Como ya se mencionó el rompeolas está ubicado en una profundidad promedio de 10 m. El diseño de este rompeolas está pensado como un rompeolas “levadizo” que se accione al presentarse la alerta de tsunami, tal como el implementado en el puerto de Shimotsu (Ver Figura 2.11).

La ubicación del rompeolas en la bahía se muestra en la Figura 3.4

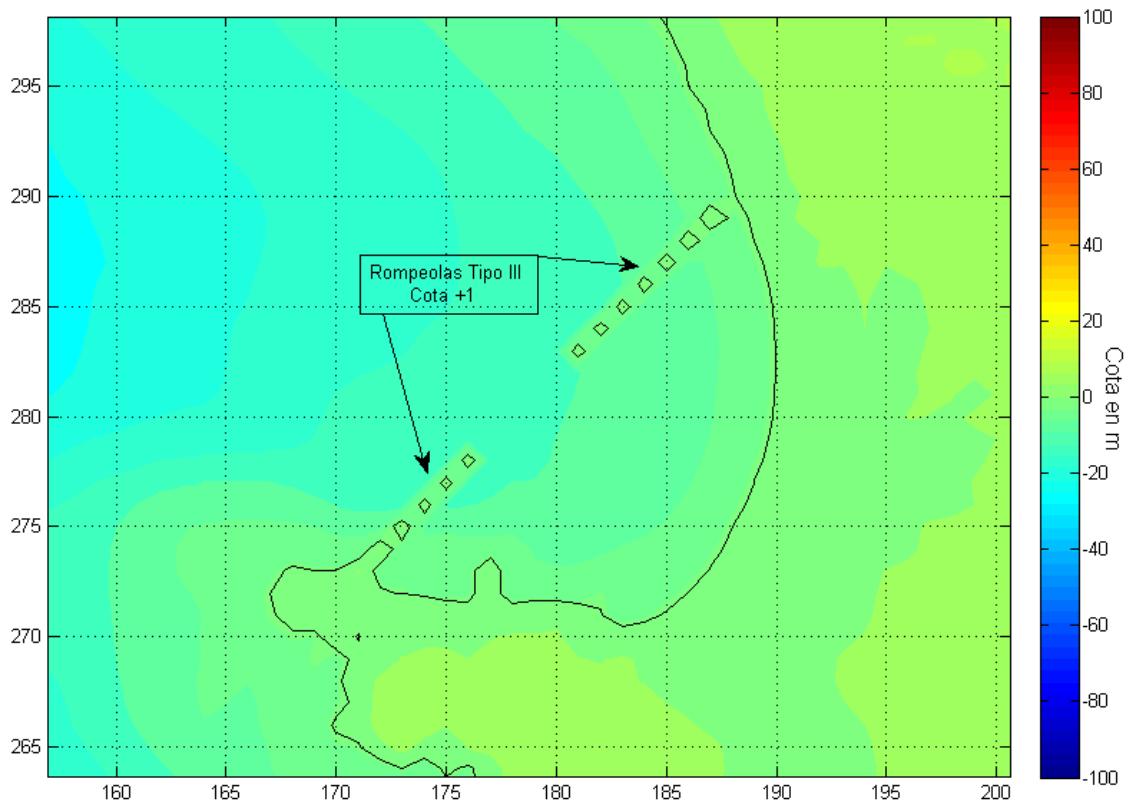


*Figura 3.4: Ubicación rompeolas tipo II en la playa de Cavancha*

### 3.4.3 Rompeolas Tipo III

El rompeolas tipo III, a diferencia de los anteriores considera dos rompeolas que dejan una abertura en el medio. Al igual que el rompeolas tipo I considera una altura de 1 m sobre el nivel medio del mar (NMM) protegiendo la zona de la playa de Cavancha. Como ya se mencionó el rompeolas está ubicado en una profundidad promedio de 10 m.

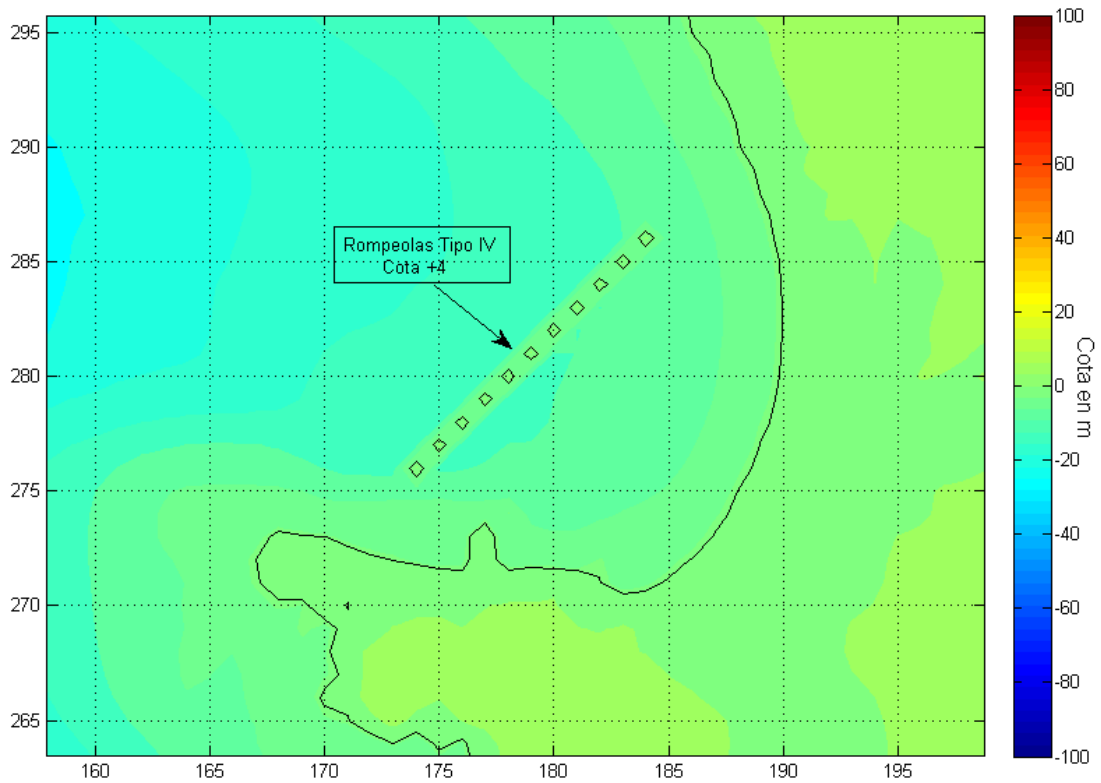
Esta configuración de rompeolas está inspirado en el implementado en Kamaishi, Japón (Ver Figura 2.10).



*Figura 3.5: Ubicación rompeolas tipo III en la playa de Cavancha*

### 3.4.4 Rompeolas Tipo IV

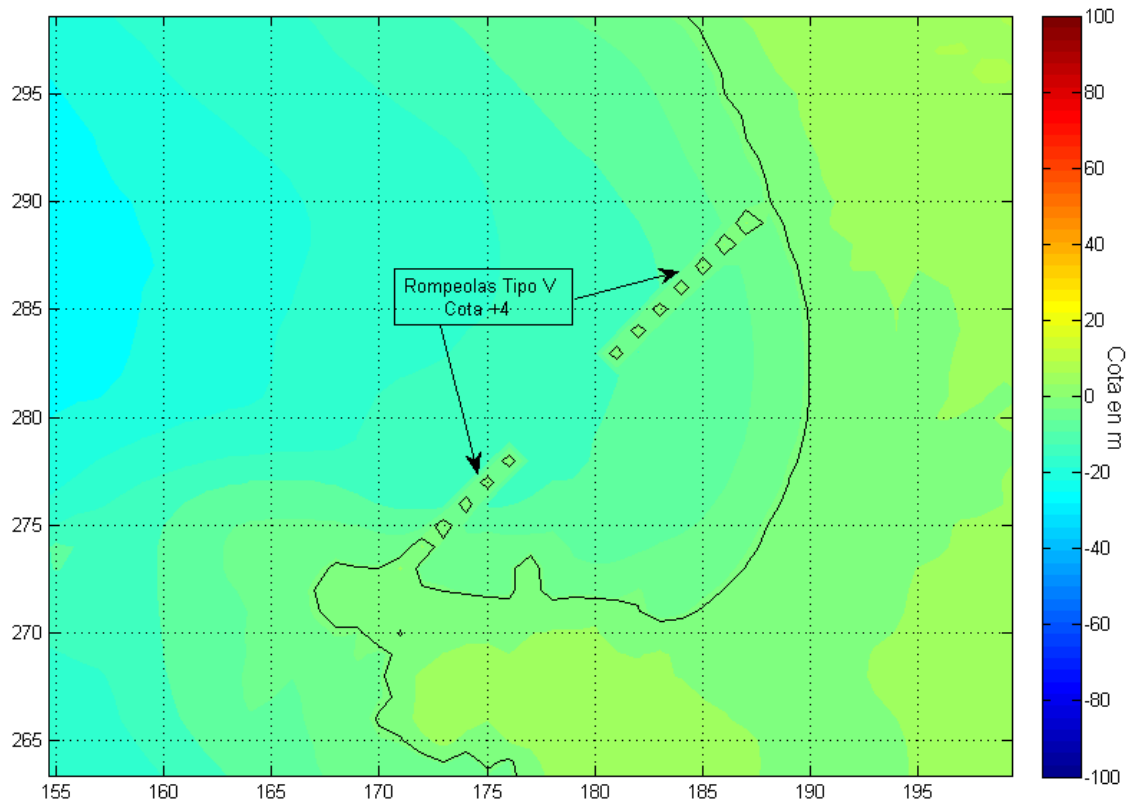
El rompeolas tipo IV considera una altura de 4 m sobre el nivel medio del mar (NMM) protegiendo parcialmente la zona de la playa de Cavancha, esto porque se dejaron dos apertura a los costados como se aprecia en la Figura 3.6. Como ya se mencionó el rompeolas está ubicado en una profundidad promedio de 10 m.



*Figura 3.6: Ubicación rompeolas tipo IV en la playa de Cavancha*

### 3.4.5 Rompeolas Tipo V

El rompeolas tipo V es igual al rompeolas tipo III en términos de configuración espacial, sin embargo considera una altura de 4 m sobre el nivel medio del mar y al igual que en todos los casos el rompeolas se encuentra a una profundidad promedio de 10 m, tal como se muestra en la Figura 3.7.



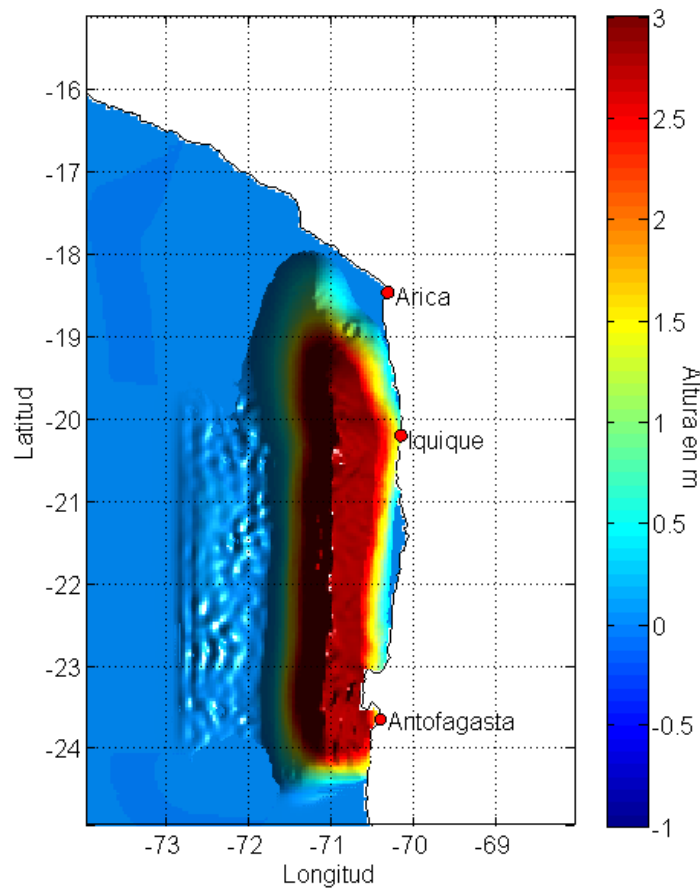
*Figura 3.7: Ubicación rompeolas tipo V en la playa de Cavancha*

## 4 Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos luego de realizadas las simulaciones para los distintos escenarios propuestos previamente, entre los resultados obtenidos se destacan: Condiciones iniciales de los eventos, mapas de inundación y series de tiempo.

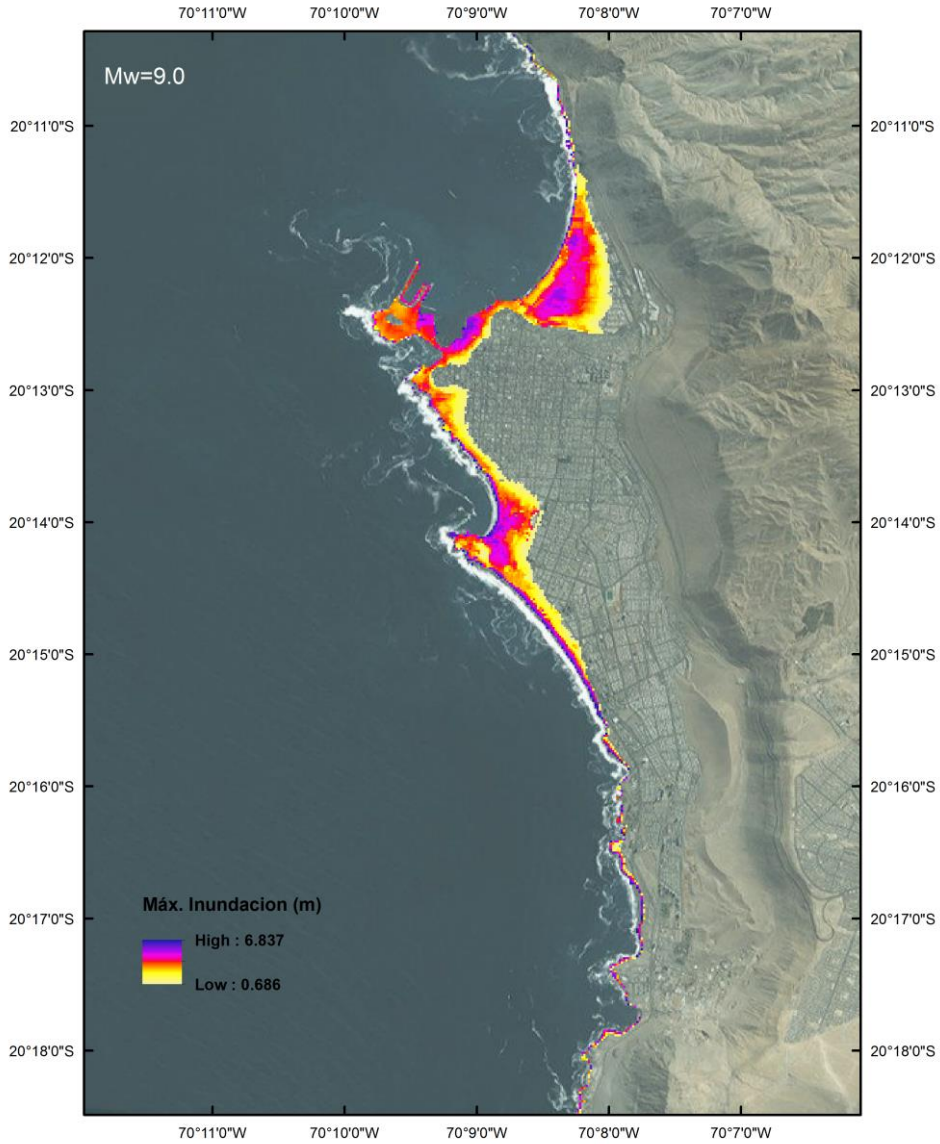
### 4.1 Evento $M_w=9.0$

La condición inicial del evento (Figura 4.1) se obtuvo mediante la formulación de Okada (1985) mediante la superposición de 335 subfallas. Se aprecia que la deformación predominante es del orden de 6-7 m.



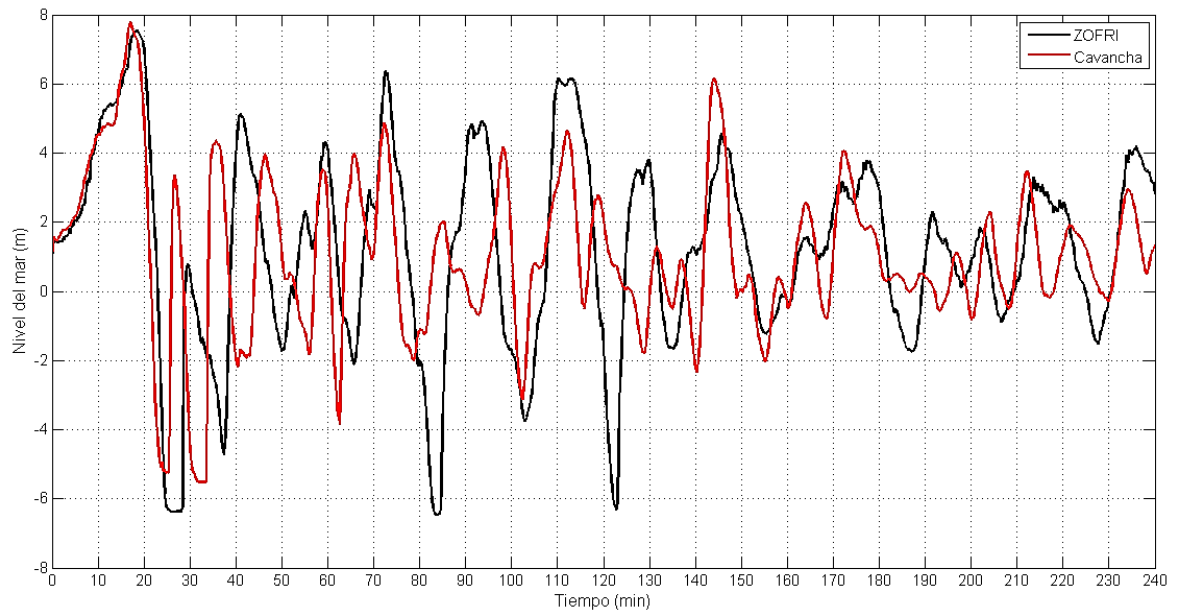
*Figura 4.1: Condición inicial del tsunami para evento  $M_w=9.0$*

La Figura 4.2 muestra la máxima profundidad de inundación, en la zona de interés la profundidad alcanza los 6.8 m en la zona más cercana a la línea de costa y luego decae hasta una profundidad aproximada de 0.6 m.



**Figura 4.2: Máxima profundidad de inundación**

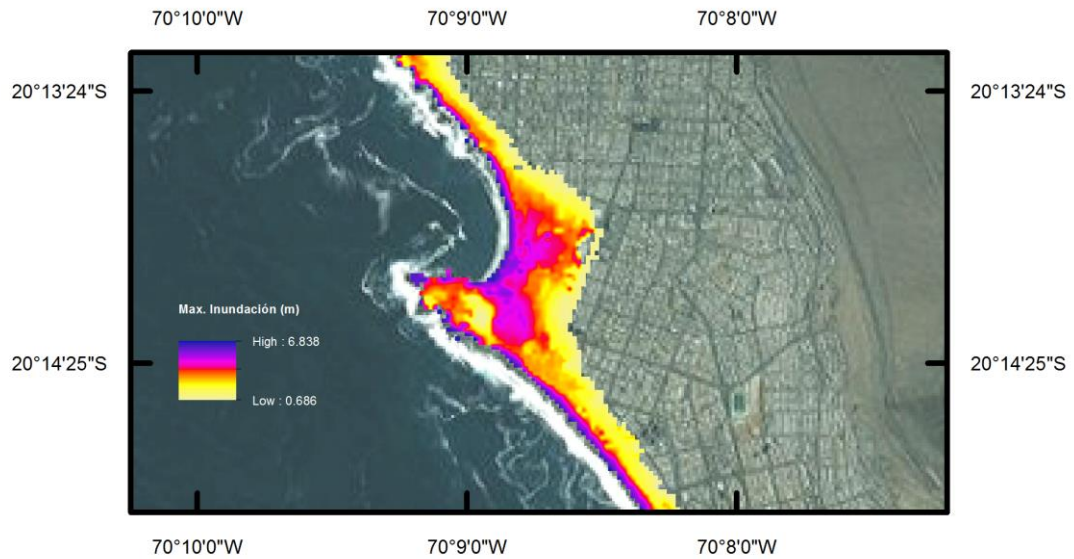
Finalmente se presenta la serie de tiempo del mareógrafo ubicado en Cavancha en la Figura 4.3. En ella es posible desprender que la primera onda arriba a los 10 minutos y se mantiene hasta los 20 minutos donde comienza a retroceder. Otro aspecto a considerar es el arribo de 2 ondas de gran magnitud que también generan una inundación significativa, la primera llega a los 70 minutos y la segunda a los 140 minutos aproximadamente. Dado que la zona de interés es Cavancha no se hace alusión a los registros obtenidos en Zofri.



**Figura 4.3:** Serie de tiempo obtenida de los mareógrafos virtuales ubicados en Zofri y Cavancha

### 4.1.1 Rompeolas tipo I

Primeramente en la Figura 4.4 se muestra la máxima profundidad de inundación donde es posible ver que no hay una disminución significativa, en comparación con la inundación sin rompeolas expuesto en el capítulo anterior. En el caso sin rompeolas la máxima inundación es del orden de 6.8 m al igual que para el caso con el rompeolas tipo I.



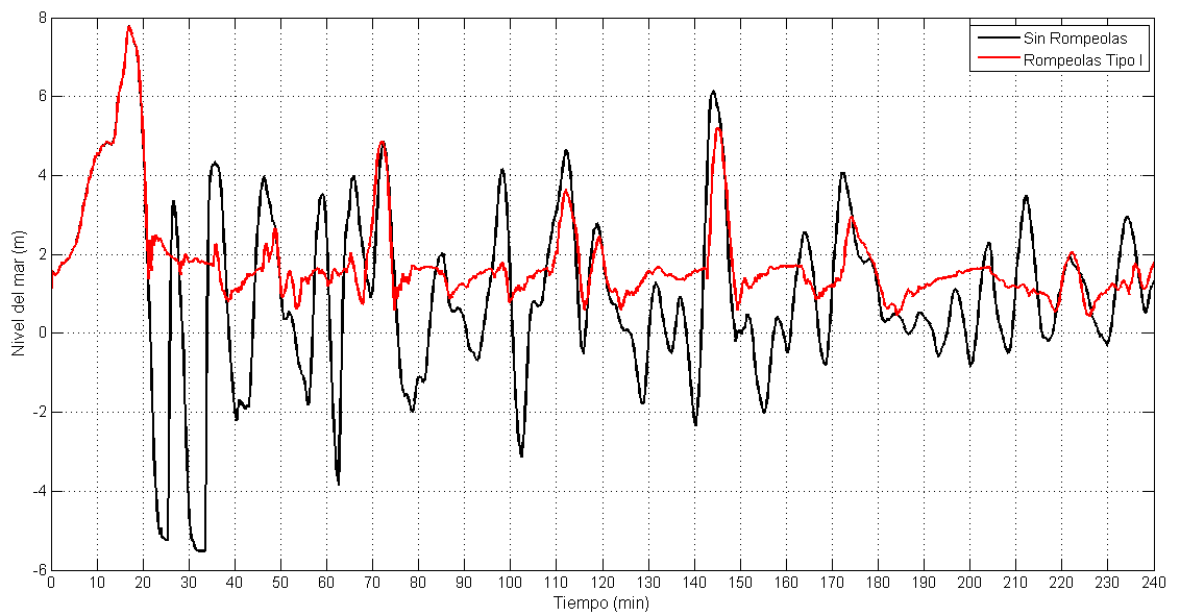
*Figura 4.4: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo I*

Por otro lado se compararon las series de tiempo en ambos casos (sin rompeolas y rompeolas tipo I) para el mareógrafo de Cavancha con el fin de verificar si el rompeolas tipo I afecta de alguna manera el tiempo de arribo de la primera onda.

En negro se graficaron los niveles del mar registrados en el caso sin rompeolas, mientras que en rojo se graficaron los datos asociados a la situación con el rompeolas tipo I.

Para la primera onda que arriba a los 10 minutos aproximadamente, no existe diferencia alguna ni en el tiempo de arribo ni el nivel alcanzado por dicha onda. Las cinco ondas posteriores a la primera se ven atenuadas considerablemente por la presencia del rompeolas, como ejemplo la cuarta onda que arriba a los 140 minutos aproximadamente disminuye en casi 1 metro, además se retrasa en un par de minutos su arribo.

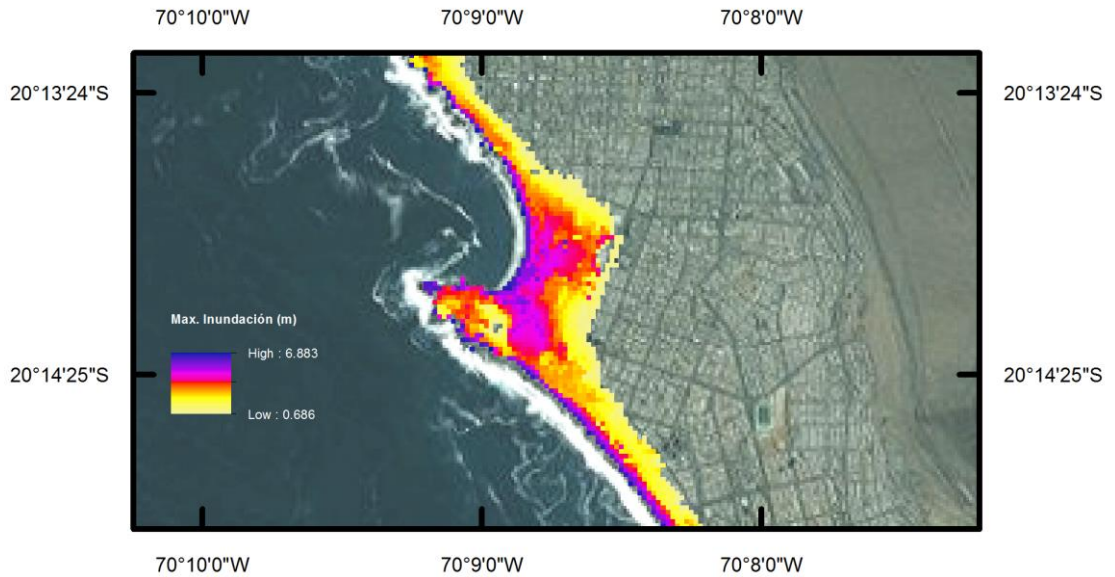
Si bien es cierto que el rompeolas tipo I en algo atenúa el tsunami los resultados no son del todo significativos como para llegar a una clara conclusión.



**Figura 4.5: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo I**

### 4.1.2 Rompeolas tipo II

La Figura 4.6 contiene las máximas profundidades de inundación registradas con el evento de  $M_w=9.0$  y la implementación del rompeolas tipo II.

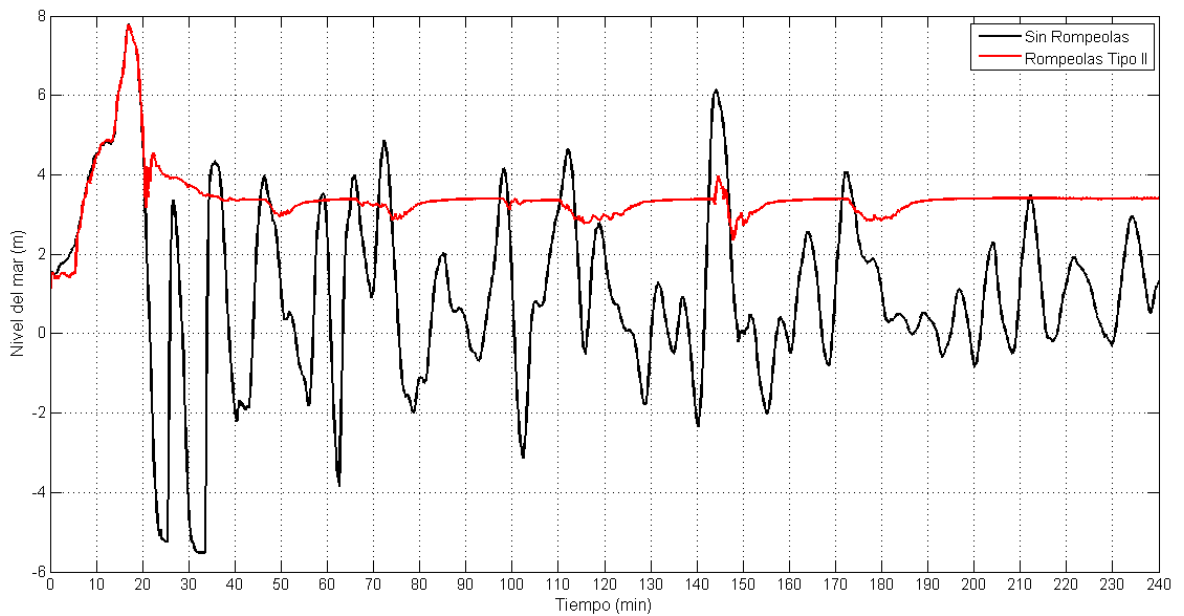


*Figura 4.6: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo II*

Nuevamente no hay diferencias significativas en la profundidad de inundación entre el caso sin rompeolas y el caso con rompeolas tipo II, incluso es ligeramente mayor para el caso con rompeolas. La máxima inundación se mantiene en aproximadamente 6.8 m en la zona de interés.

En la serie de tiempo (Figura 4.7) es posible apreciar que el rompeolas tipo II no retrasa el tiempo de arribo de la primera onda ni disminuye la profundidad de inundación.

Por otra parte luego del arribo de la primera onda y su retroceso, se aprecia un nivel del mar medianamente estable lo cual, en ningún caso significa que las 2 ondas restantes de mayor magnitud no se presenten. Éste fenómeno se puede deber a que la colocación del rompeolas no deja apertura alguna en la bahía por lo cual se genera una suerte de “laguna” en la zona comprendida entre la espalda del rompeolas y la línea de costa. Lo anterior, a priori, no es representativo del fenómeno físico real puesto que luego de la primera onda arriban varias ondas más y aún así el nivel del mar registrado no cambia, la onda que arriba a los 140 minutos tiene 6 metros de altura en el caso sin rompeolas y se reduce en casi 2 metros con el rompeolas lo cual es extraño.

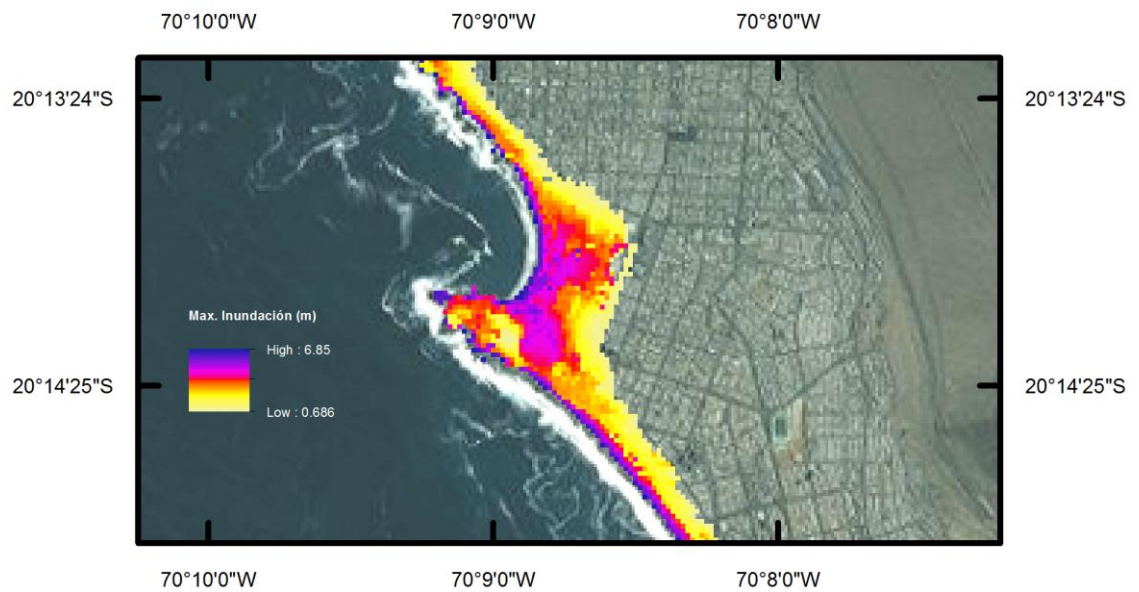


**Figura 4.7: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo II**

### 4.1.3 Rompeolas tipo III

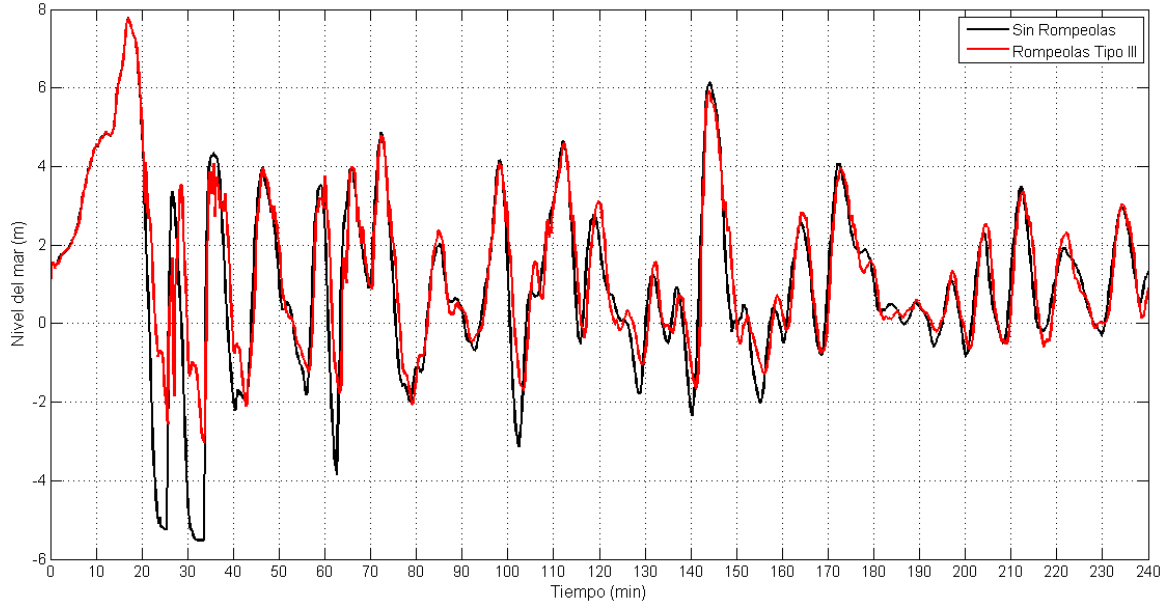
Las máximas profundidades de inundación se muestran en la Figura 4.8, donde es posible apreciar que no hay cambios significativos por lo cual se puede inferir que el rompeolas tipo III (Ver capítulo 3.4.3) tampoco es efectivo en la mitigación del tsunami.

Nuevamente la profundidad máxima de inundación en la zona de estudio es del orden de 6.8 m.



*Figura 4.8: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo III*

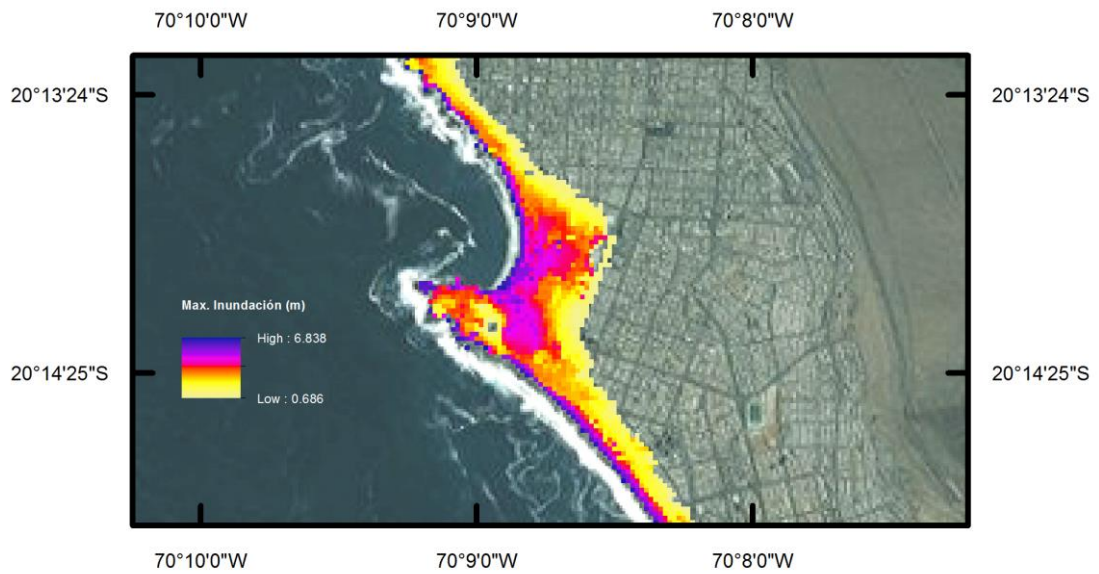
La serie de tiempo asociada al rompeolas tipo III es casi idéntica a la situación sin rompeolas, solo en algunos puntos de la gráfica hay una disminución de la amplitud lo que no supone un real efecto mitigador del rompeolas. Tampoco hay un retraso del momento de arribo de la primera onda y dado que esta configuración deja libre una zona de la bahía no se produce el efecto de “laguna” apreciado en la configuración anterior.



**Figura 4.9: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo III**

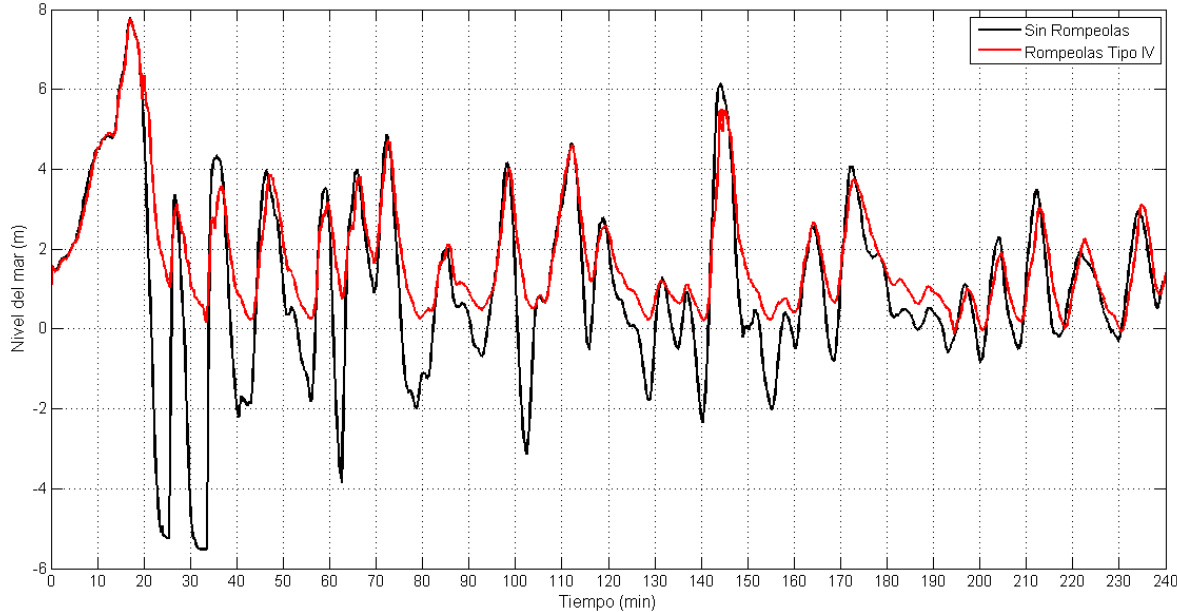
#### 4.1.4 Rompeolas tipo IV

La Figura 4.10 muestra las máximas profundidades obtenidas en la simulación, no hay una disminución en la profundidad máxima, por otro lado el mapa de inundación es casi idéntico al obtenido sin implementar un rompeolas. La mayor profundidad de inundación es del orden de 6.8 m en la zona de interés.



*Figura 4.10: Máxima profundidad de inundación para rompeolas tipo IV*

La serie de tiempo (Figura 4.11) muestra que la configuración adoptada en este capítulo no es suficiente para retrasar el arribo de la primera onda, la cual es la más destructiva. No obstante ocurre una disminución del nivel del mar en la onda que arriba aproximadamente a los 140 minutos, dicha disminución es de aproximadamente 40 cm, lo cual no es una variación significativa además lo que interesa es mitigar el efecto de la primera onda que es la que más rápido llega a la zona costera.

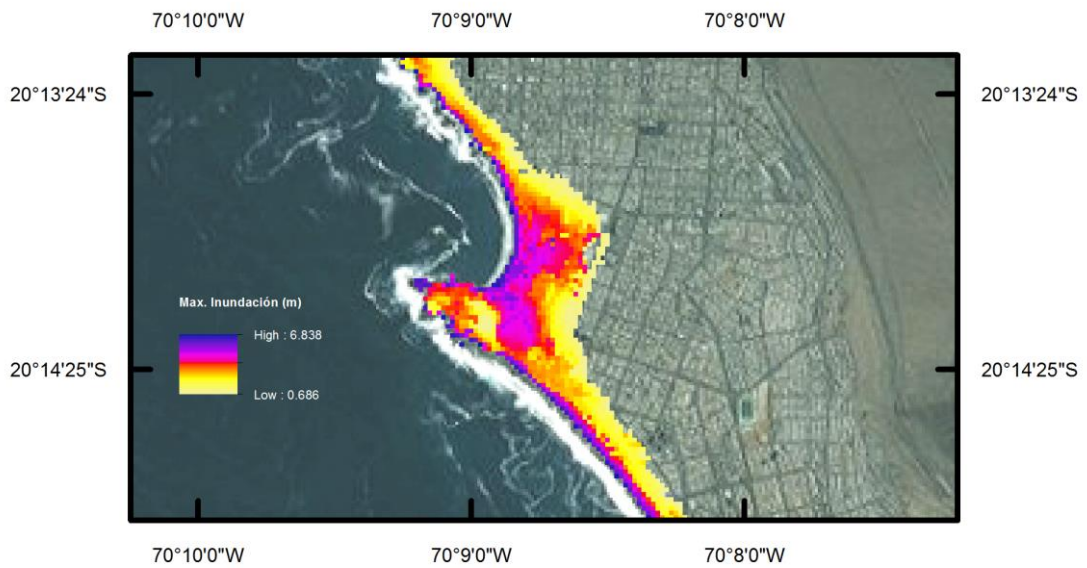


**Figura 4.11: Serie tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo IV**

#### 4.1.5 Rompeolas tipo V

Al igual que en las configuraciones anteriores no se aprecian cambios en las profundidades máximas de inundación, donde las mayores siguen siendo del orden de 6.8 m en la zona de interés. Tampoco se aprecian nuevas zonas inundadas o zonas que estuvieron inundadas en la situación sin rompeolas y que ahora no lo estén.

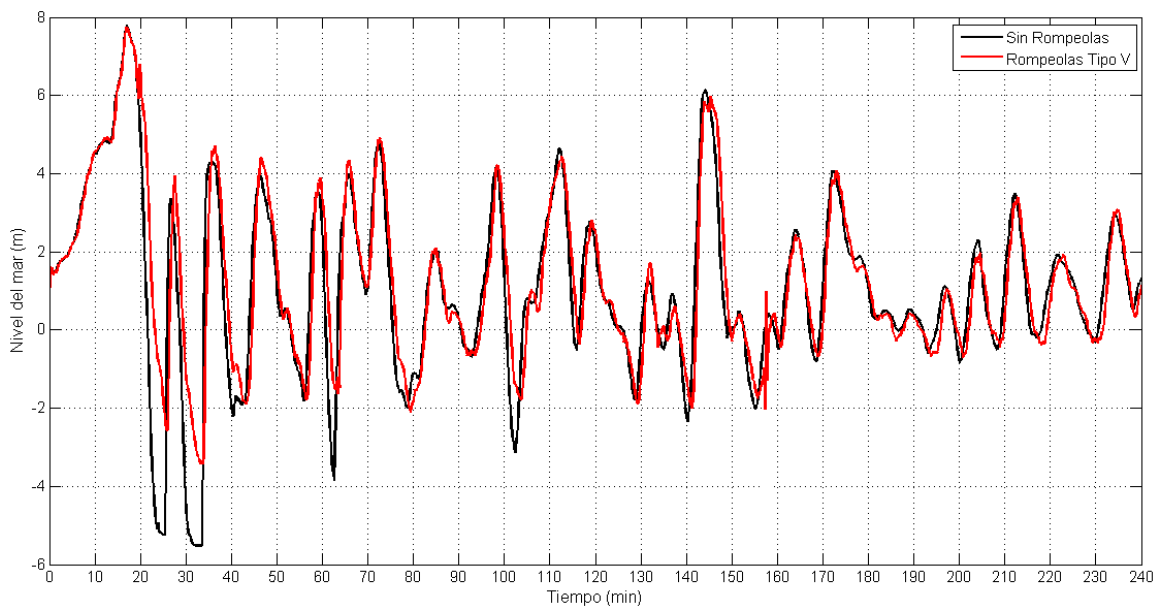
El mapa de inundación asociado a la inundación sumado a la implementación del rompeolas tipo V se muestran en la Figura 4.12



*Figura 4.12: Máximas profundidades de inundación para rompeolas tipo V*

La serie de tiempo realizada con el mareógrafo virtual ubicado en frente a la playa de Cavancha arroja que no existe efecto del rompeolas en el tiempo de arribo de la primera onda y tampoco logra disminuir la altura de la misma.

Se aprecia que ambas serie temporales son casi idénticas entre sí, lo que reafirma que casi no hay efecto de este rompeolas, solo en algunos puntos específicos se logra vislumbrar un ligero retraso en las ondas, sin embargo no es suficiente para concluir que ayuda en algo a minimizar los efectos del tsunami.

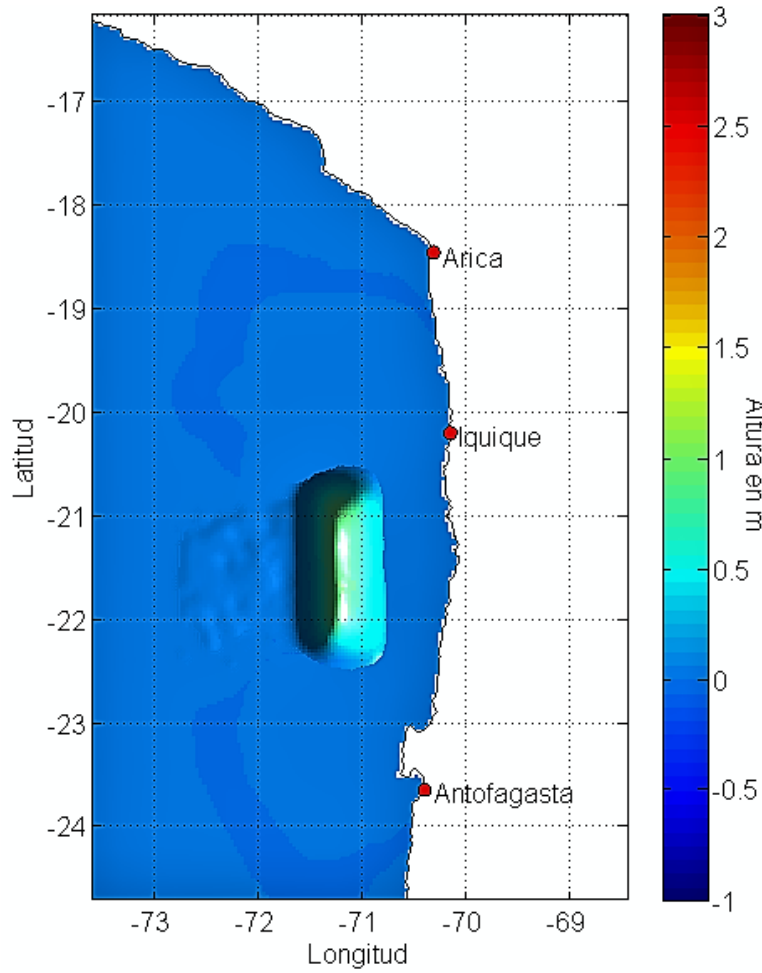


**Figura 4.13: Serie de tiempo sin rompeolas v/s rompeolas tipo V**

## 4.2 Evento $M_w=8.0$

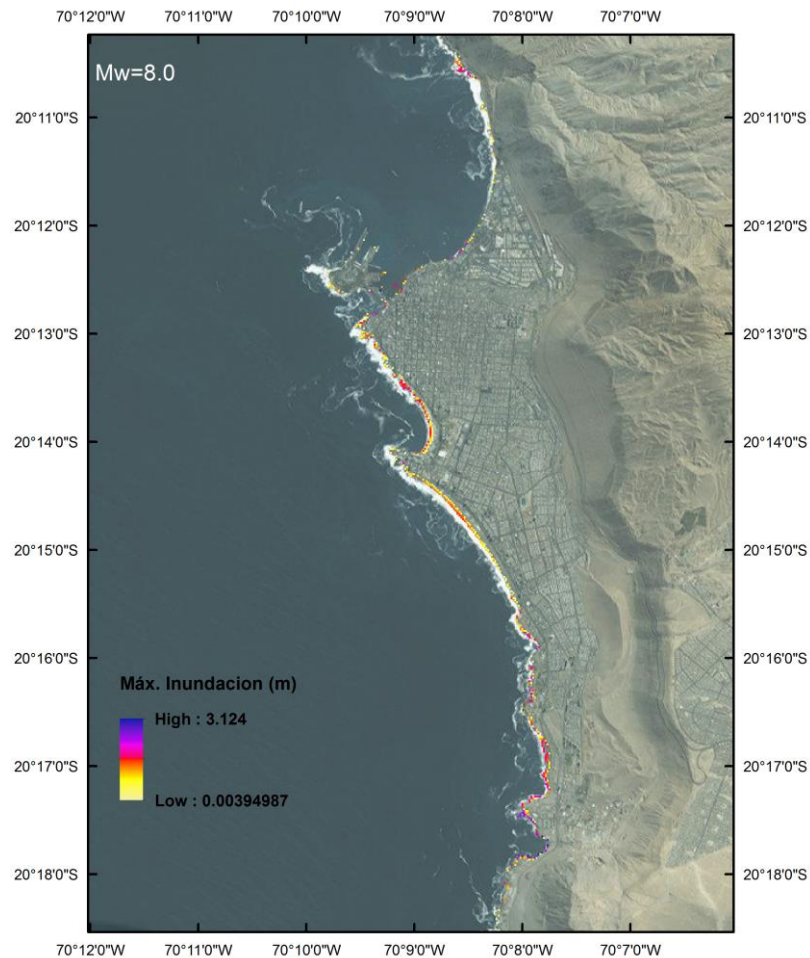
La condición inicial de este evento de magnitud  $M_w=8.0$  fue determinada mediante la formulación de Okada y se muestra en la Figura 4.14.

La deformación máxima para este evento ronda los 3.5-4 metros.



**Figura 4.14: Condición inicial  $M_w=8.0$**

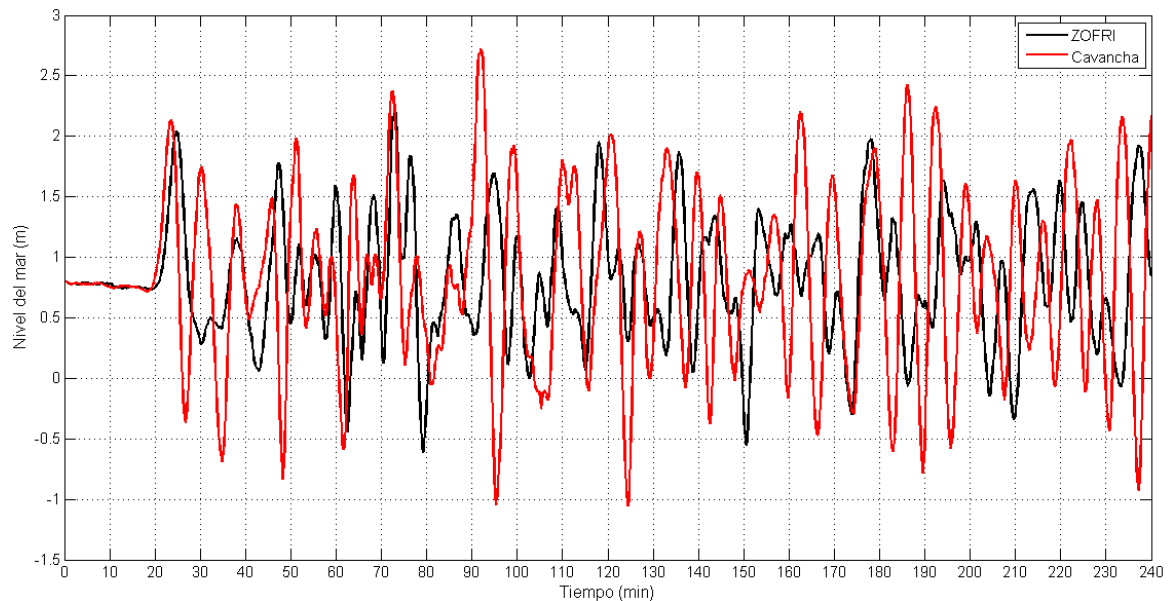
El mapa con las máximas inundaciones se muestra en la Figura 4.15, en ella se aprecia que la inundación solo alcanza la zona más próxima a la playa con alturas de inundación máximas de 2 metros en la zona de interés, solo en la parte más al norte de la bahía se alcanza una profundidad de aproximadamente 3 metros pero el área afectada es pequeña.



**Figura 4.15: Máximas profundidades para evento  $M_w = 8.0$**

Al igual que en el evento 9.0 se utilizaron dos mareógrafos, uno ubicado frente a Zofri y el otro frente a Cavancha para obtener las series de tiempo asociadas al tsunami.

En negro se grafican los datos obtenidos en Zofri y en rojo los obtenidos en Cavancha, estos últimos interesan y serán comparados más adelante. Las series temporales se pueden apreciar en la Figura 4.16.



**Figura 4.16: Serie de tiempo para evento  $M_w = 8.0$**

Es posible observar que la primera onda arriba a los 20 minutos y alcanza una altura de 2.2 metros aproximadamente, luego una segunda onda arriba a los 88 minutos y alcanza una altura superior a la primera de aproximadamente 2.75 metros. Las dos ondas antes mencionadas son las más importantes puesto que llegan rápidamente.

Se aprecian claras diferencias en los registros de los tsunamis, lo cual se puede deber a un fenómeno de resonancia tal como lo menciona Catalán et al (2015) en su investigación. En ella encontró que cerca de Tocopilla se encuentra un nodo lo que genera una disminución de la energía del tsunami, por otro lado señala que en la zona de ruptura se generan las mayores amplitudes y que dicha zona se ve afectada por la resonancia.

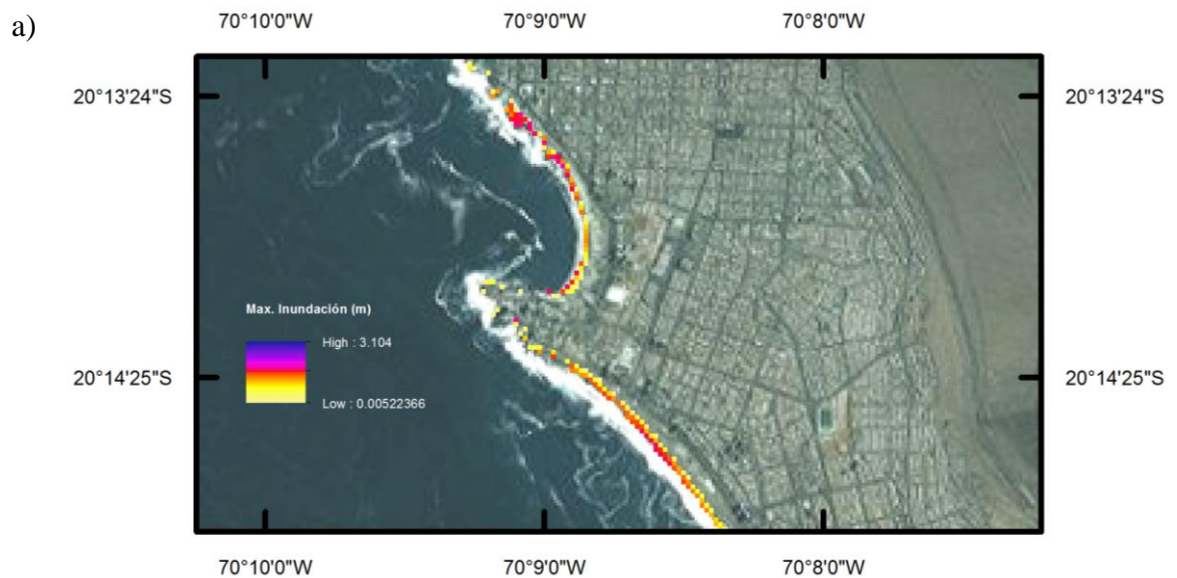
Es importante destacar que, luego de revisar los resultados obtenidos en el capítulo anterior se optó por analizar qué pasa con la configuración de rompeolas tipo IV y V, esto bajo la premisa que como son los de mayor envergadura (ambos tienen una cota de +4 m) deberían tener una mejor performance cuando los eventos son menores.

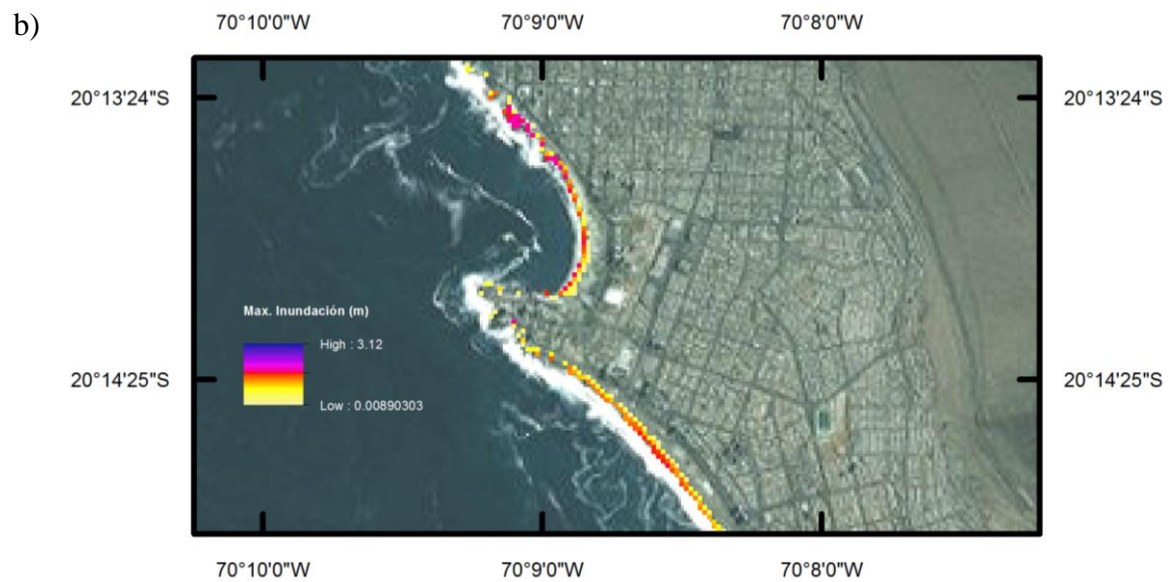
#### 4.2.1 Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.0

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos luego de realizar la simulación numérica implementando los rompeolas tipo IV y V.

En la Figura 4.17-a) es posible apreciar las profundidades de inundación máxima para el caso del rompeolas tipo IV, en comparación con la situación sin rompeolas se presenta una disminución en el área inundada aunque se mantiene la profundidad, lo que daría indicios que la configuración ayuda a disminuir el efecto del tsunami.

Por otro parte el rompeolas tipo V no genera mayores cambios, no se aprecian zonas donde la inundación haya disminuido o derechamente no se presentara, las máximas inundaciones nuevamente están el orden de 2-2.5 metros en la zona de la bahía de Cavancha (Figura 4.17-b).





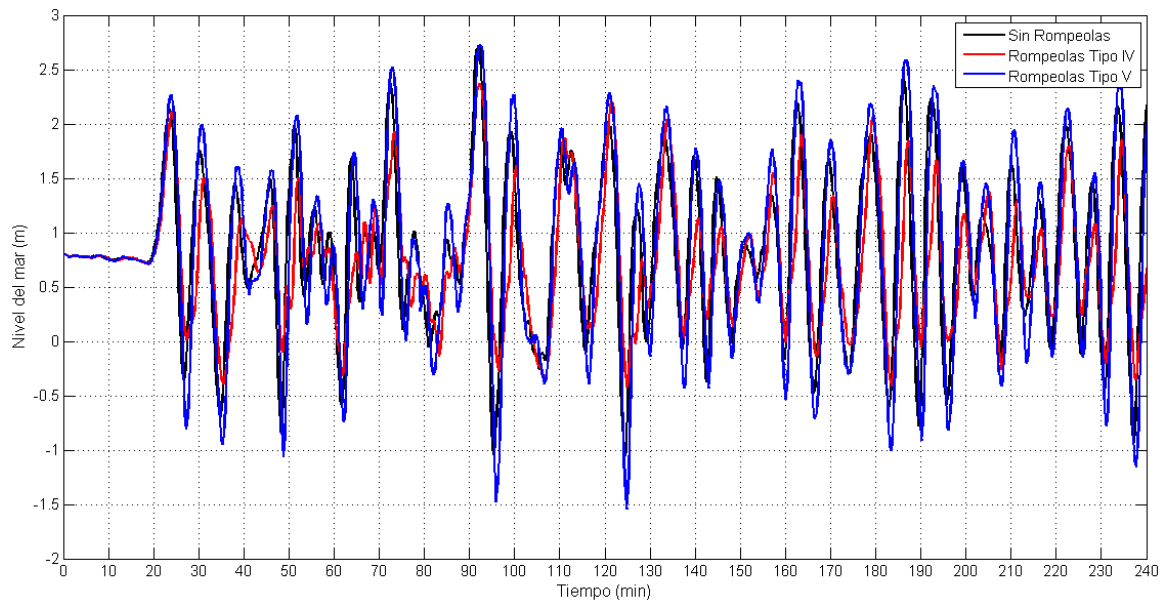
***Figura 4.17: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V***

Por otra parte, se graficaron las series temporales (Figura 4.18) para la situación sin rompeolas (en negro), rompeolas tipo IV (en rojo) y rompeolas tipo V (en azul).

En el caso del rompeolas tipo IV (datos en rojo), no hubo disminución ni en el tiempo de arribo ni en la altura de la primera onda que arriba en comparación con la situación sin rompeolas. Caso contrario es la onda que arriba a las 90 minutos aproximadamente, puesto que no se retrasa su arribo pero si disminuye su altura en presencia del rompeolas tipo IV, la diferencia es de aproximadamente 0.4 metros lo cual desde el punto de vista de la mitigación es insignificante ya que para los 90 minutos la posible evacuación ya se llevó a cabo.

Para el rompeolas tipo V (datos en azul) ocurrió un efecto contrario al esperado puesto que en todos los casos tienen alturas ligeramente mayores con diferencias de 0.2 metros como máximo, lo anterior se puede atribuir a un fenómeno de resonancia aunque para asegurar lo anterior se debe realizar un análisis más acabado que está fuera de los alcances de este estudio.

Por lo anterior es que, más que mitigar los efectos del tsunami en este caso el rompeolas tiene un efecto contrario aumentando ligeramente las alturas por lo cual no cumple el efecto deseado. Tampoco se ve afectado el tiempo de arribo de ninguna de las ondas del tsunami.

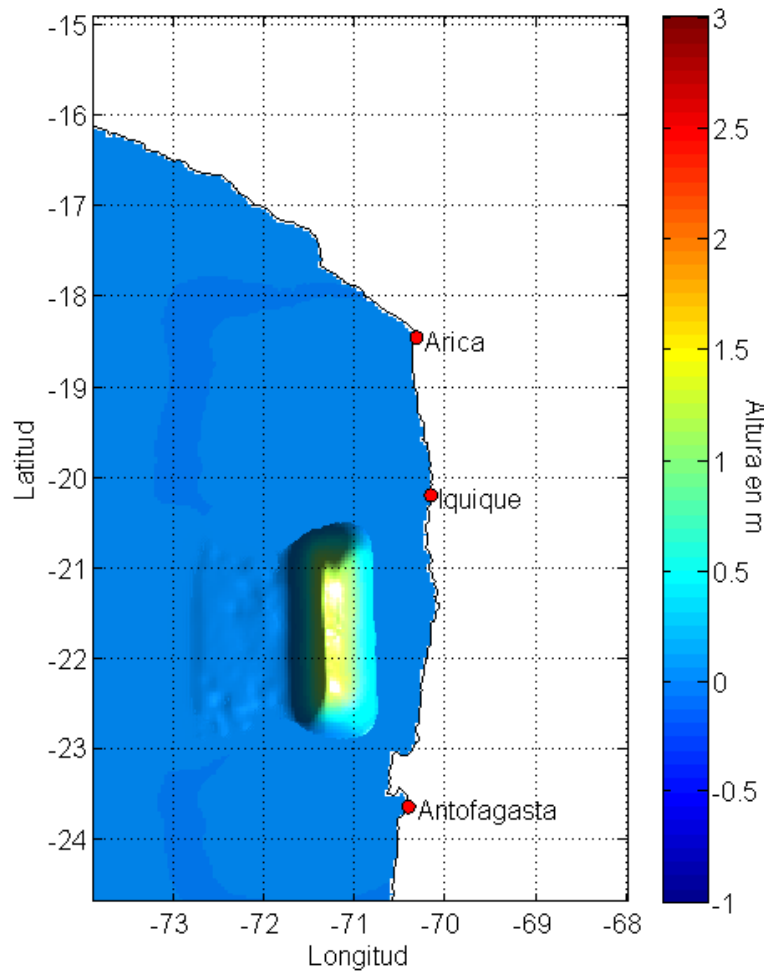


**Figura 4.18:** *Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.0*

### 4.3 Evento $M_w=8.2$

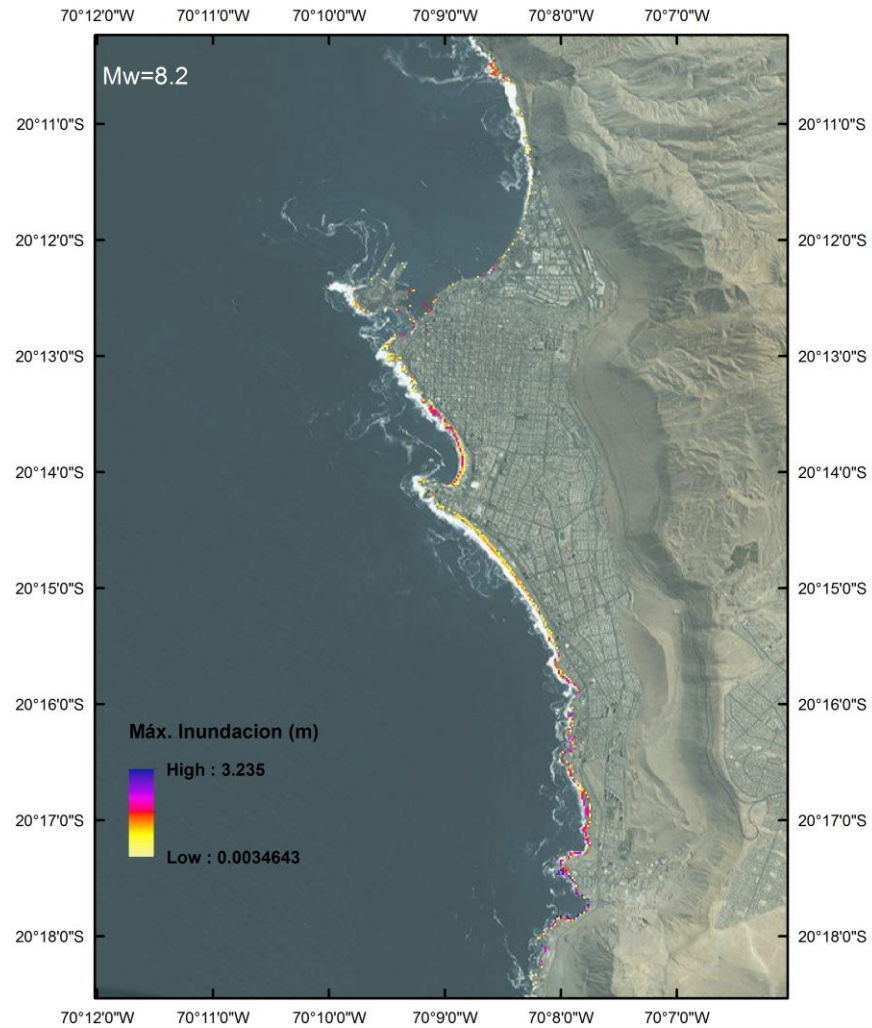
La condición inicial de este evento al igual que los anteriores se obtuvo a partir de la formulación de Okada y se presenta en la Figura 4.19.

Las máximas deformaciones son de aproximadamente 3 metros, muy similar al evento de  $M_w=8.0$  aunque el área del evento aquí presentado es mayor.



**Figura 4.19: Condición inicial para evento  $M_w = 8.2$**

A continuación en la Figura 4.20 se muestra el mapa de inundación obtenido luego de la simulación numérica.

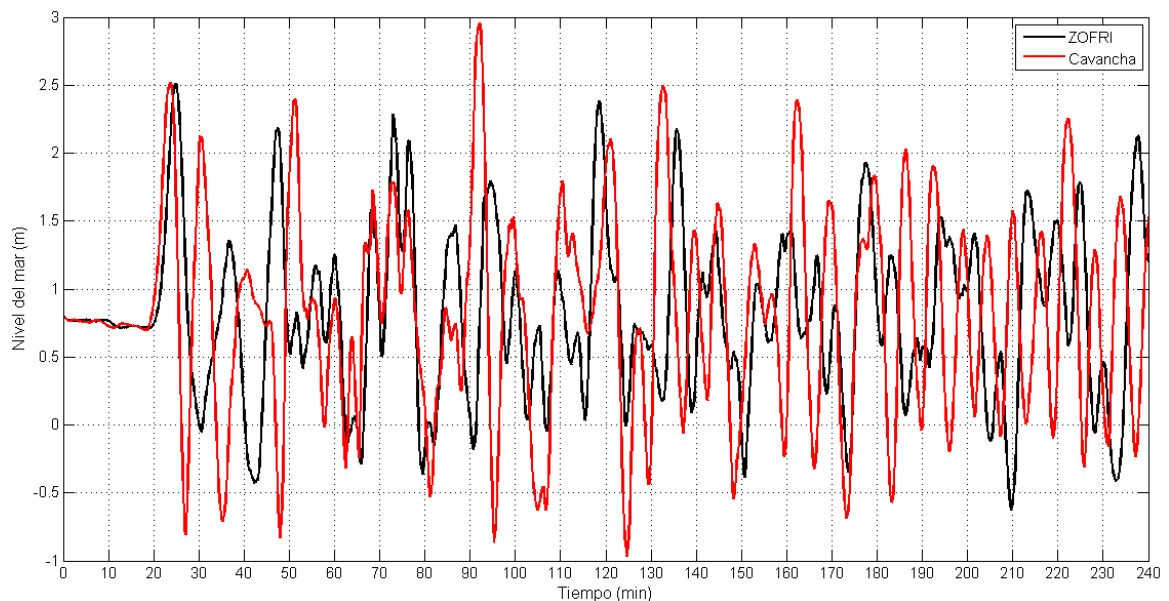


**Figura 4.20: Mapa de inundación máxima**

La máxima inundación se produce en la zona de playa brava donde alcanza los 3.2 metros, sin embargo esa zona no es de interés en esta investigación. Por otro lado en la zona de Cavancha la inundación alcanza los 2.5-2.8 metros aproximadamente.

Se graficaron las series de tiempo con ayuda de los mareógrafos virtuales dispuestos en la zona de Zofri y Cavancha para tener una idea de cómo arriba el tsunami a la costa, la gráfica se muestra en la Figura 4.21, en ella se aprecia que la primera onda arriba a los 20 minutos aproximadamente teniendo un peak de 2.5 metros, luego se presentan una serie de ondas similares a la primera hasta el minuto 90 donde arriba una gran onda que alcanza los 2.9 metros y que podría ser la que más destrucción provoque, sin embargo en ese momento la evacuación ya se habría completado por que lo que es importante enfocarse en el análisis y mitigación de la primera onda.

Otro aspecto a considerar en futuros análisis es que en la zona de Zofri las alturas son menores cuando arriban las ondas mayores en Cavancha ypa de forma contraria cuando se presentan ondas con alturas mayores en Zofri las que se presentan en Cavancha son de menor magnitud.



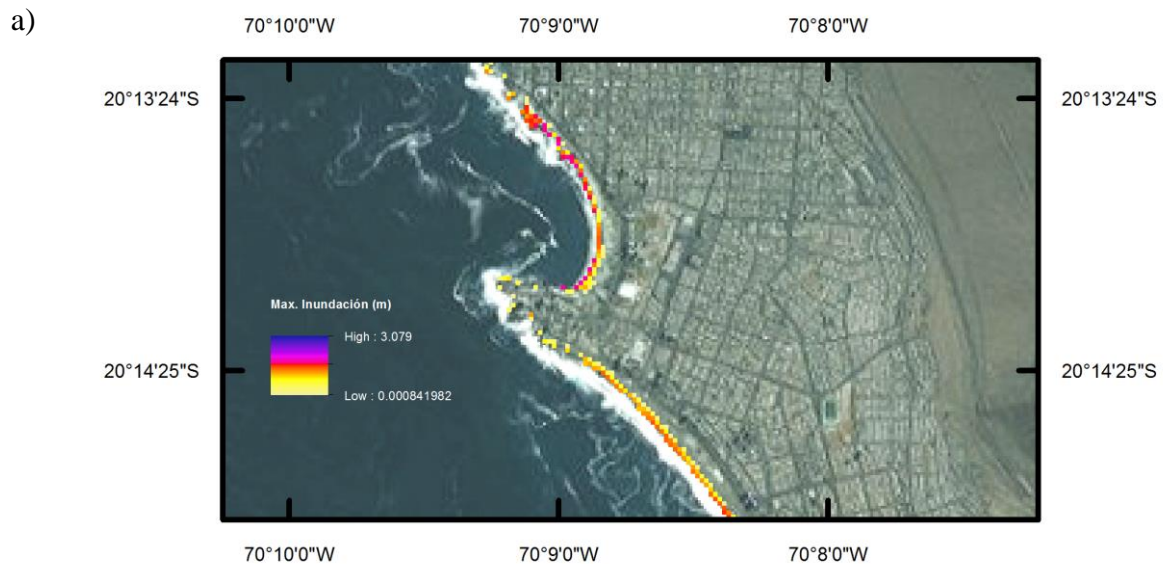
**Figura 4.21: Serie de tiempo para evento  $M_w = 8.2$**

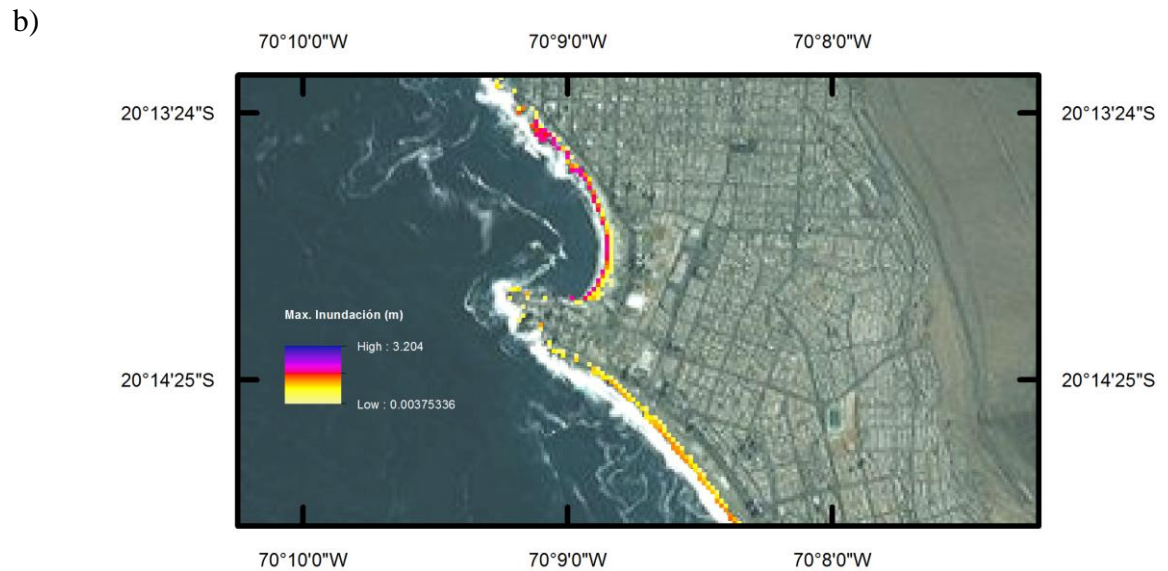
### 4.3.1 Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.2

Se agregó a la topografía de los rompeolas tipo IV y V para posteriormente modelar el evento de magnitud de momento 8.2 para ver si dichos rompeolas tiene algún efecto que mitigue la inundación producida por el tsunami.

La Figura 4.22-a) muestra las máximas inundaciones en la zona de Cavancha, para el rompeolas tipo IV, con dicho rompeolas se logran disminuir en aproximadamente 0.2 metros la profundidad máxima en la zona de la bahía, sin embargo no es significativo a la hora de concluir que efectivamente reduce la inundación.

Por otro lado, la Figura 4.22-b) corresponde a la inundación producida luego de implementar el rompeolas tipo V. Al igual que lo ocurrido en el evento de magnitud de momento 8.0 cuando se implementa el rompeolas, se produce un aumento en la máxima profundidad de casi 20 centímetros lo cual puede ser, a priori, indicador de amplificación o resonancia en la bahía producto de la presencia del rompeolas. Cabe recordar que para el caso sin rompeolas la inundación máxima es de 3 metros y acá se alcanzan 3.2 metros.

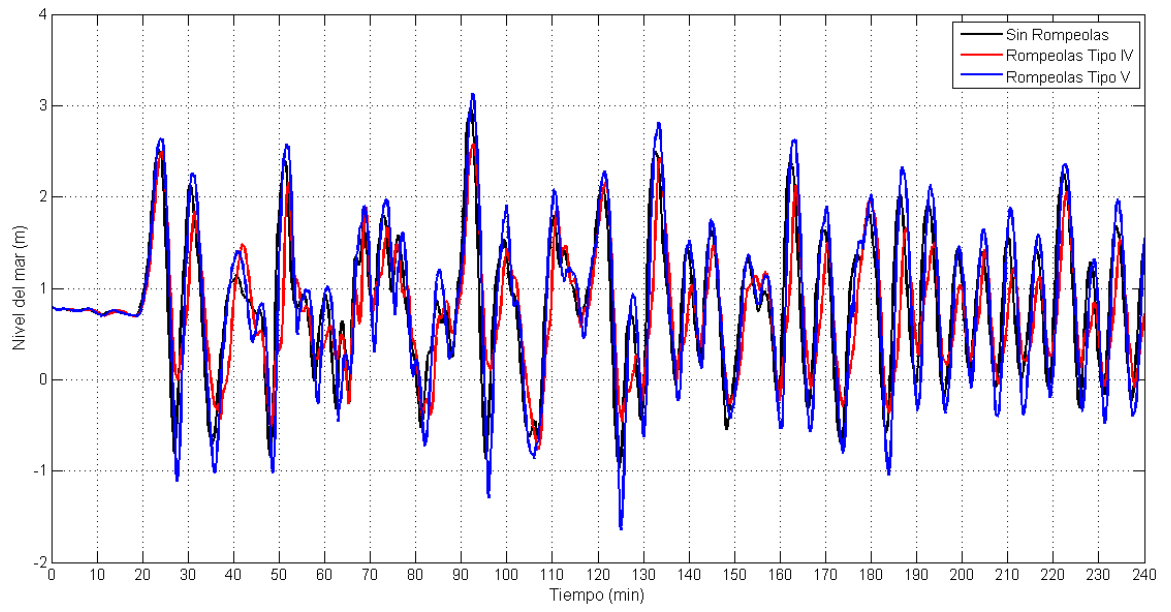




**Figura 4.22: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V**

Para tener un poco más de claridad respecto a cómo afecta el rompeolas, se graficaron las series de tiempo para comparar de mejor manera los resultados. En negro los datos sin rompeolas, en rojo con rompeolas tipo IV implementado y en azul con rompeolas tipo V implementado.

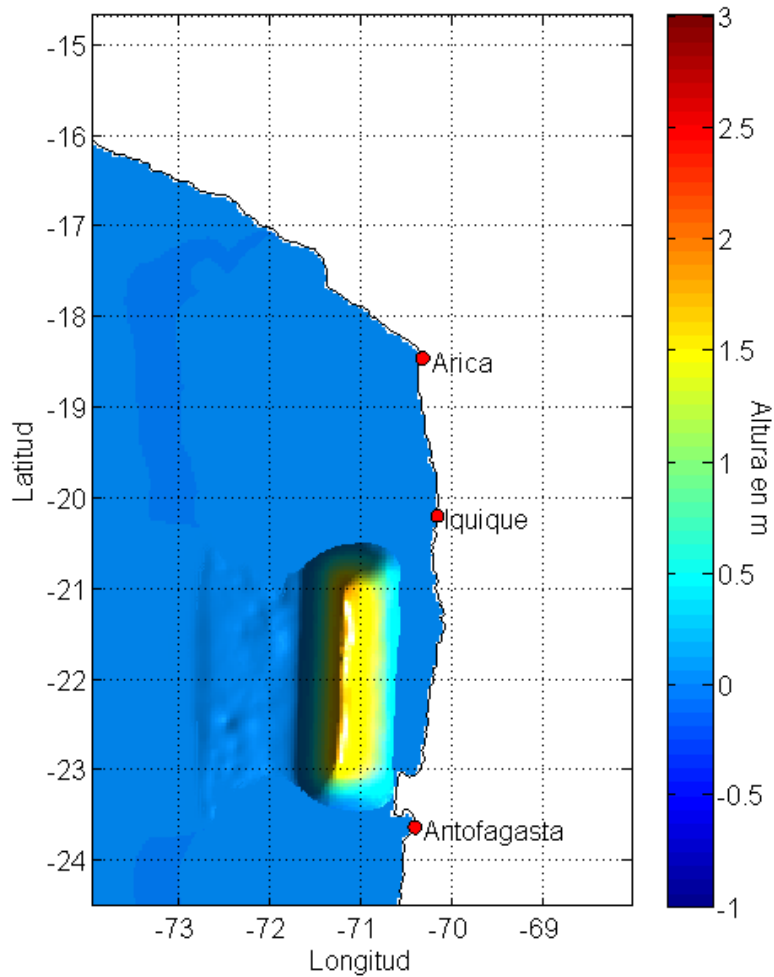
La primera onda no se ve afectada por la presencia del rompeolas tipo IV puesto mantiene la misma altura y tiempo de arribo, por otro lado las ondas posteriores a la primera si disminuyen su altura en algunos centímetros pero no de manera significativa. La onda que arriba a los 90 minutos es la que mayor descenso presenta con casi 0.5 metros de diferencia. Es claro que el tiempo de arribo de las ondas no cambia con la presencia del rompeolas tipo V, como se mencionó más arriba ocurre un aumento en la altura de las ondas si se compara la situación con rompeolas y sin rompeolas, dicha diferencia es del orden de 3-4 centímetros. Un claro ejemplo se aprecia en la onda que arriba a los 90 minutos que aumenta su altura en 3.5 cm en presencia del rompeolas tipo V. Todo lo anterior se presenta en la Figura 4.23.



**Figura 4.23:** Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.2

#### 4.4 Evento $M_w=8.4$

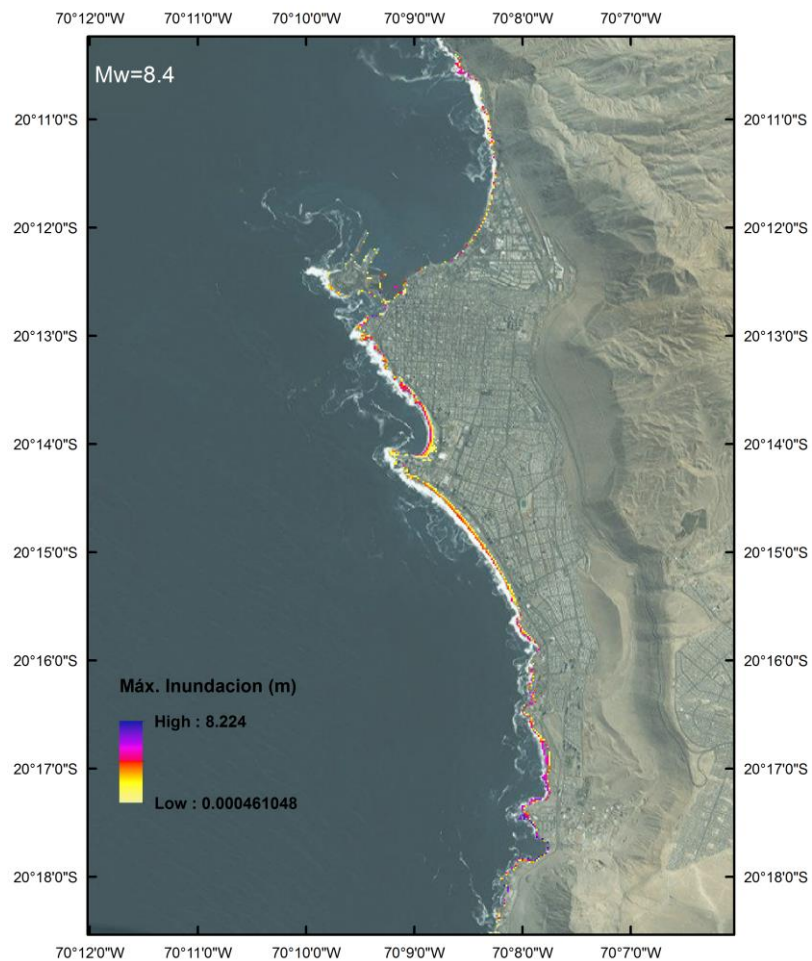
La condición inicial de este evento (Figura 4.24) fue determinada mediante la formulación de Okada, tal como los casos anteriores. La máxima deformación en este caso es de aproximadamente 5 metros en algunas zonas, mientras que la mayor parte de la zona de ruptura presenta deformaciones del orden de 2.5-3 metros.



*Figura 4.24: Condición inicial para evento  $M_w=8.4$*

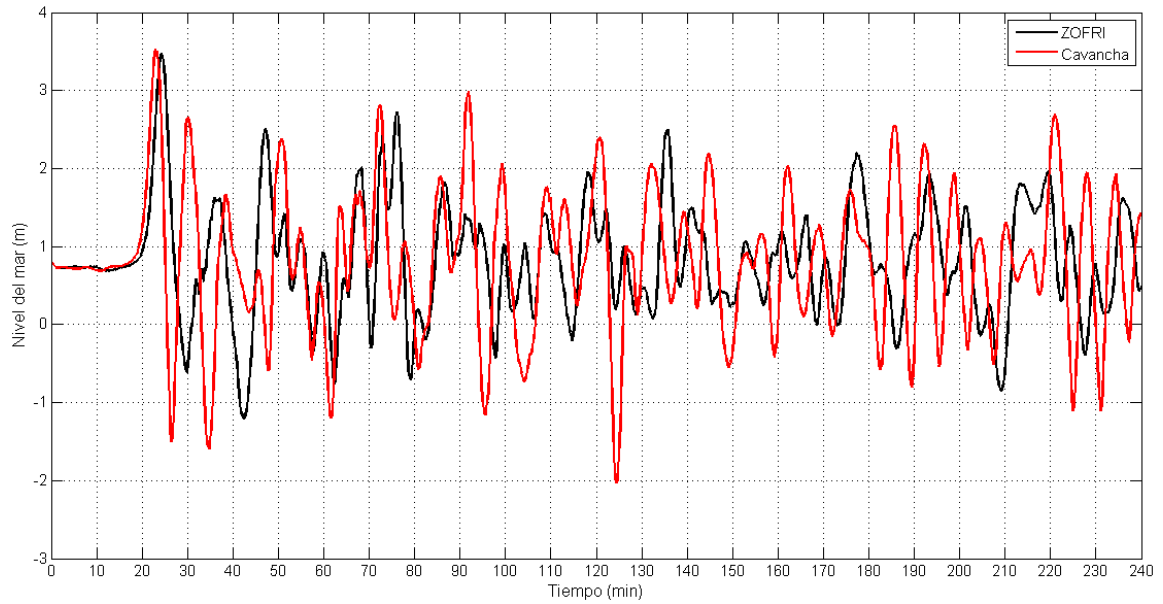
La Figura 4.25 muestra las máximas profundidades de inundaciones, ocurre algo curioso puesto la máxima profundidad es de 8 metros aproximadamente y se produce en la zona de playa brava que queda al sur de la bahía de Cavancha. Adicionalmente y como dato esa zona es la más cercana a la zona de ruptura del evento, esa podría ser la razón de una profundidad de inundación tan grande.

Por otro lado en la zona de interés las profundidades se mantienen en aproximadamente en 3.5 metros.



**Figura 4.25: Mapa con inundación máxima para evento  $M_w=8.4$**

Se presenta la Figura 4.26 que contiene la serie de tiempo con los registros obtenidos en Zofri y Cavancha por los mareógrafos virtuales, esto con el fin de identificar las ondas que arriban a la costa.



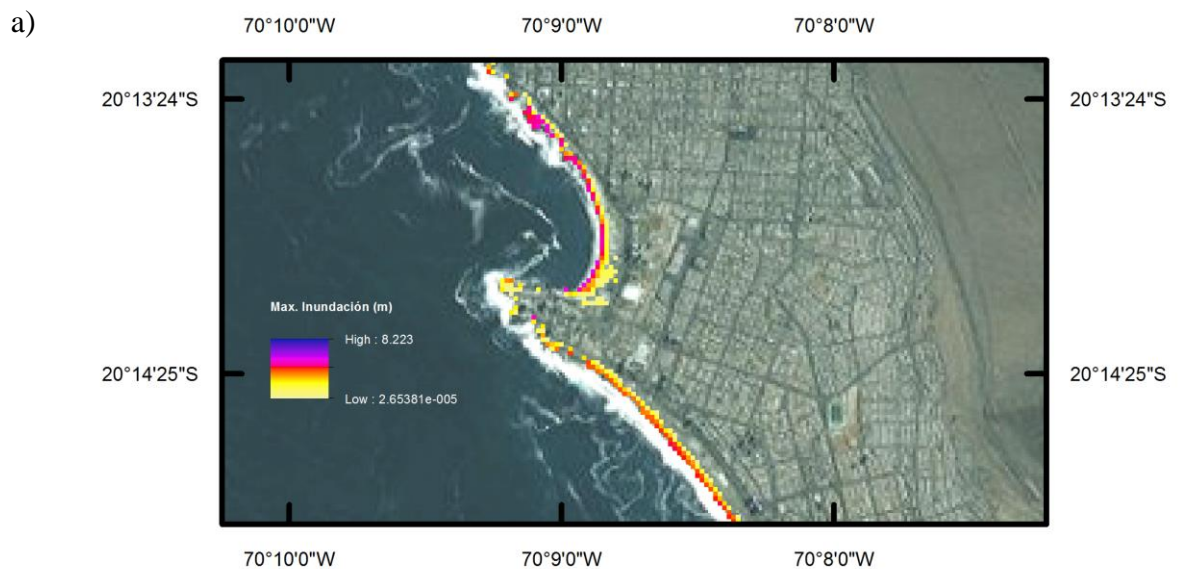
**Figura 4.26: Serie de tiempo para evento  $M_w = 8.4$**

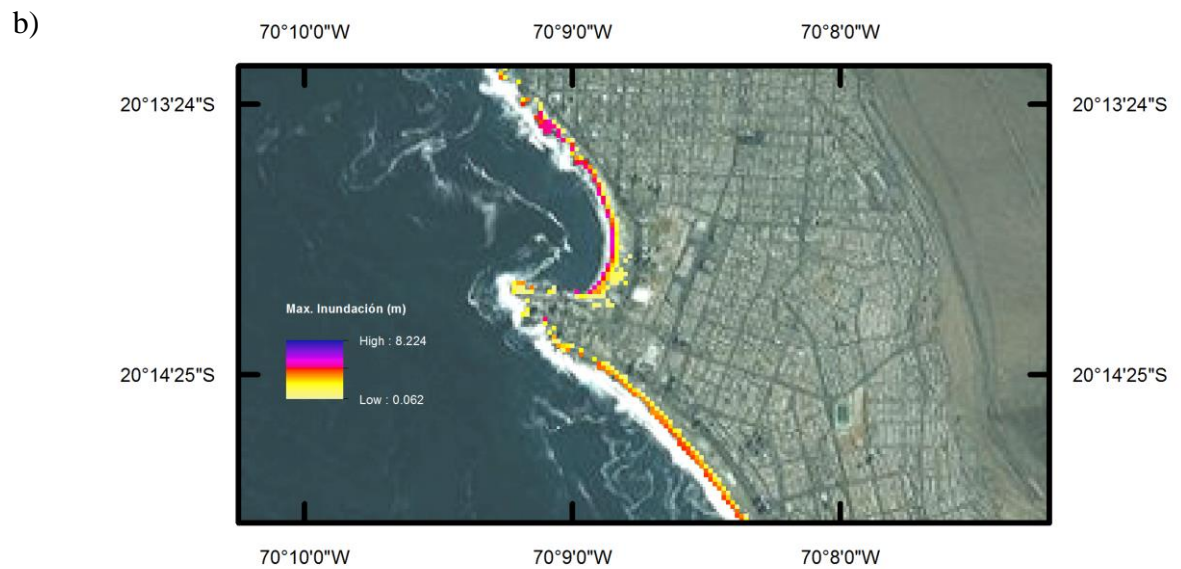
La primera onda llega a los 20 minutos aproximadamente alcanzado una altura de 3.5 metros e inmediatamente después se presenta otra onda que alcanza su peak a los 30 minutos, con una altura de 2.6 metros. Posterior a eso arriban una serie de ondas que registran alturas de entre 2 y 3 metros, la más importante en términos de altura es la que se presenta a los 90 minutos alcanzando los 3 metros.

#### 4.4.1 Implementación de rompeolas tipo IV y V para evento 8.4

La Figura 4.27-a) muestra la inundación máxima en la zona de estudio, donde se alcanzan profundidades de 3-3.5 metros y que solo abarcan una pequeña porción de la zona costera de Cavancha. No se aprecia que el rompeolas tipo IV haya ayudado a mitigar el tsunami puesto que las zonas y profundidades de inundación no cambian entre la situación con rompeolas y sin rompeolas.

Al igual que en los casos anteriores no existen mayores cambios al implementar el rompeolas tipo V, se mantienen las profundidades cercanas a las 3.5 metros en la zona de la bahía. Es importante recalcar que los 8.2 metros que aparecen en la escala de la imagen es un valor que se da en la zona de playa brava, al sur de la zona de estudio (Figura 4.27-b)).



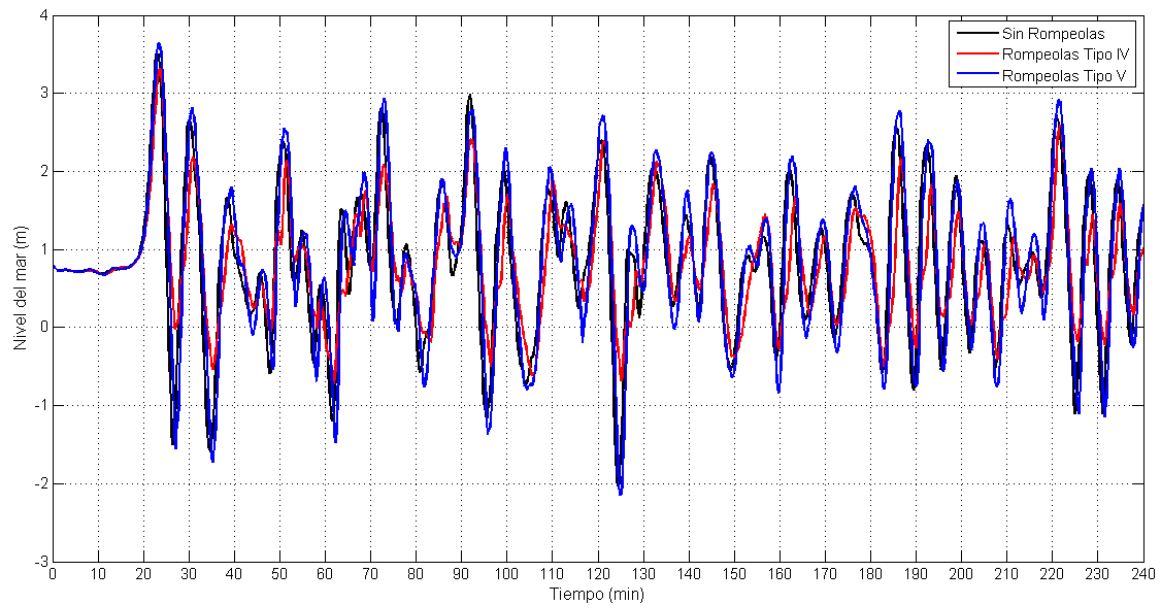


***Figura 4.27: Máximas profundidades de inundación para rompeolas: a) Tipo IV y b) Tipo V***

Al igual que en los casos anteriores, se graficaron los datos (Figura 4.28) registrados por el mareógrafo de Cavancha, en negro los datos cuando no se ha implementado el rompeolas, en rojo cuando el rompeolas tipo IV está implementado y en azul para el rompeolas tipo V.

En presencia del rompeolas tipo IV, se produce una disminución en las alturas del nivel del mar en cada una de las ondas generadas por el tsunami. La primera onda que arriba a los 20 minutos decae en aproximadamente 0.2 metros, por otro lado las restantes ondas también disminuyen su altura, algunos ejemplos son la onda que arriba a los 70 y disminuye su altura en 0.7 metros aproximadamente o el caso de la onda que llega a la costa a los 90 minutos y desciende en casi 0.5 metros lo cual si podría ser significativo.

Mientras que el rompeolas tipo V, al igual que en los escenarios anteriores, genera el mismo fenómeno de amplificación de las ondas independiente del escenario que se modeló. En la primera onda que arriba a la costa se aprecia un ligero aumento de unos 0.1 m, mientras que la onda que llega a la costa a los 120 minutos muestra una diferencia entre la situación sin rompeolas y con rompeolas de 0.3 metros. En cuanto al tiempo de arribo no se ven cambios con la presencia de los rompeolas.



**Figura 4.28:** *Serie de tiempo para situación con los rompeolas implementados en evento 8.4*

## 5 Medidas de mitigación complementarias

Dado que por sí solo ninguno de los rompeolas propuestos en el capítulo anterior logra mitigar de manera significativa la llegada del Tsunami es que se proponen otras medidas de mitigación que en conjunto con el rompeolas pueden atenuar los efectos destructivos del mismo. Todas las obras señaladas en este capítulo pueden ser acompañadas por una modificación del terreno en la costa, aumentando la cota de terreno mediante rellenos y así, por un lado reducir la magnitud de la obras de mitigación y por otro mantener las viviendas cercanas a la costa más resguardadas.

### 5.1 Medidas estructurales

#### 5.1.1 Muros costeros

Los muros costeros son ampliamente utilizados para atenuar el efecto del oleaje al llegar a la costa, generalmente son construidos en hormigón armado y de forma cóncava. Cuatro años después del terremoto de 2011, Japón comenzó la construcción de un gran muro costero de 400 km de largo que en algunos puntos de su extensión tendría la altura equivalente a un edificio de 5 pisos (Ver Figura 5.1) ([www.t13.cl](http://www.t13.cl), 2014).



*Figura 5.1: A la izquierda: Muro en construcción, Japón (Fuente: [www.latercera.com](http://www.latercera.com)).*

*A la derecha: Muro en Dichato, Chile (Fuente: [www.mop.cl](http://www.mop.cl)).*

En general los muros costeros son estructuras relativamente fáciles de construir, además como ya se mencionó puede ser utilizado tanto para atenuar el oleaje como para mitigar el tsunami. Su utilización en conjunto con un rompeolas debería afectar el tiempo de arribo del tsunami. En contraparte suponen un costo de inversión relativamente alto y en la mayoría de los casos vienen acompañados de mejoras de suelo para evitar la erosión. Este último punto es sumamente relevante puesto que la erosión puede jugar un importante papel a la hora de que el muro resista la carga generada por el tsunami.

Para Cavanca, la posibilidad de utilizar un muro es factible en toda la orilla de la playa (Ver Figura 5.2). Como ya se confirmó en el capítulo 4 el evento  $M_w=9.0$  es demasiado destructivo y puede que incluso el rompeolas en conjunto con un muro no sea suficiente para mitigar los efectos del tsunami. Por lo tanto en primera instancia tal vez no sea ilógico diseñar o estimar la altura del muro en función de eventos más pequeños como los ya propuestos, por ejemplo el evento  $M_w=8.4$  genera profundidades de inundación del orden de 3.5-4 m por lo cual pensar a priori en un muro de 3 o 4 metros no sería descabellado. No obstante es importante considerar el impacto visual que supone un muro de esa envergadura.



***Figura 5.2: Posible emplazamiento del muro en Cavanca (Fuente Google Earth)***

### 5.1.2 Compuertas

Las compuertas son utilizadas para drenar el agua generada por la inundación por canales establecidos, no son muy utilizadas por el alto costo que conlleva puesto que no solo se debe pensar en la construcción y mantenimiento de las compuertas, sino en la construcción de los canales para evacuar el agua. Además que las compuertas se pueden ver afectadas por el sismo previo al Tsunami.

Nuevamente Japón, luego del terremoto y Tsunami de 2011, empezó a trabajar en compuertas que no evacuan el agua sino que la retiene, generando un seudo “Rompeolas en tierra”. Lo innovador del proyecto impulsado por ingenieros, constructores e investigadores del país Nipón es que el sistema no requiere de ninguna intervención humana para funcionar.

La compuerta está construida con un material flotante en su parte inferior y un espacio de reserva, al llenarse de agua dicho espacio, el material hace que flote y la compuerta se eleva para cerrarse automáticamente (Ver Figura 5.3).

Este tipo de compuerta supone una alternativa más amigable que el muro, puesto que solo se activa cuando ocurre el evento y no afecta el paisaje de la zona. También es cierto que su poder de retención podría ser inferior al de un muro costero.



*Figura 5.3: Funcionamiento de Compuerta (Fuente: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2013/06/04/puertas-aleta/>)*

### 5.1.3 Bosque de mitigación

Los bosques de mitigación son una alternativa amigable con el medio ambiente y que se está popularizando puesto que no solo representa una medida de mitigación sino también un pulmón verde y un posible atractivo turístico si se complementa con lugares de esparcimiento. Además de mitigar el efecto de la onda también son capaces de detener posibles escombros que fueron arrastrados por el tsunami (Imai et al, 2012).

Los contra de utilizar un bosque como medida de mitigación contra tsunamis es el tiempo que demora en generarse el efecto deseado, además que un tsunami demasiado destructivo (como el  $M_w=9.0$  planteado en esta investigación) podría arrancar los arboles generando aún más daños que los propios del tsunami por lo cual se debe realizar un estudio acabado del suelo donde se plantará el bosque.

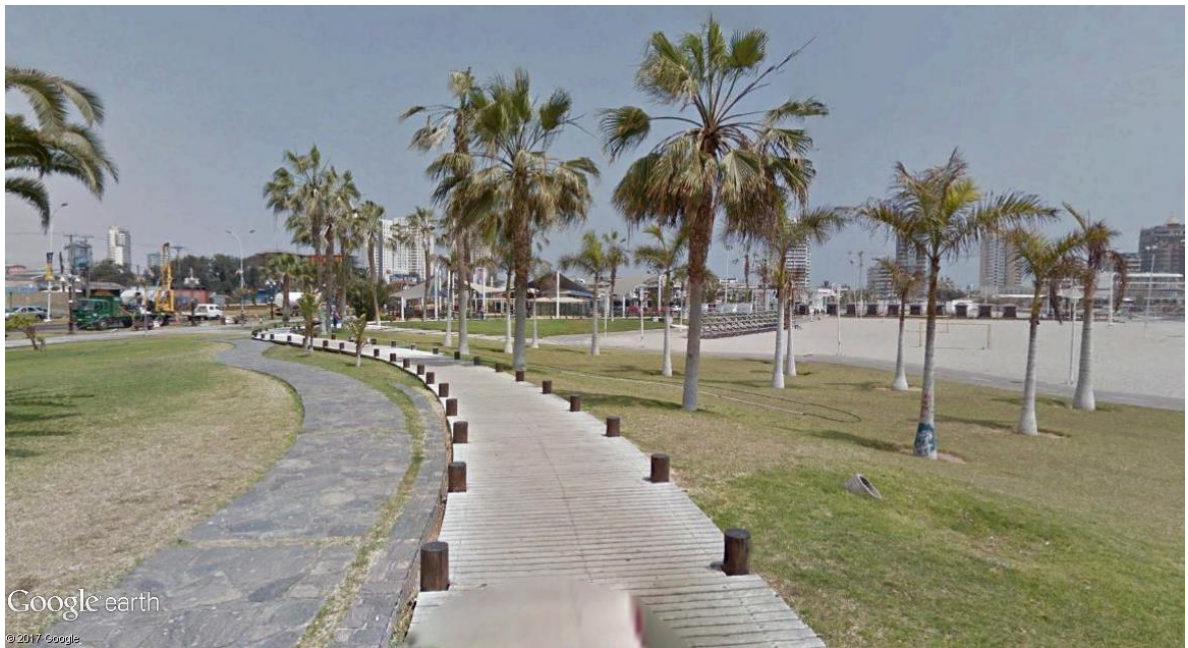
En el plan de reconstrucción del borde costero en Dichato consideró un bosque de mitigación (Ver Figura 5.4) que estaría “operable”, es decir, cumpliría con el efecto mitigador deseado en aproximadamente 30 años después de su implementación.



*Figura 5.4: Bosque mitigación en Dichato (Fuente: [http://lepezanzianarquitecto.blogspot.cl/2012\\_11\\_06\\_archive.html](http://lepezanzianarquitecto.blogspot.cl/2012_11_06_archive.html))*

Si bien es cierto un bosque podría suponer una buena idea para mitigar el tsunami, en una zona turística como Iquique podría conllevar problemas para el comercio que se encuentra en el borde costero. Además que los edificios que tiene vista al mar verían “desaparecer” esa vista puesto que el bosque podría taparles la visual.

Una medida como esta requiere una consulta ciudadana para poder ser puesta en marcha, no obstante en el paseo de la playa existen palmeras (Figura 5.5) que pueden cumplir la función no de mitigar sino de atrapar posibles escombros lo que igualmente ayuda bastante. Por otra parte se debe estudiar la factibilidad de utilizar un bosque de mitigación en el norte puesto que el clima restringe el tipo de vegetación a utilizar, las palmeras pueden ser una buena opción para realizar el bosque pero requiere de estudios más acabados.



***Figura 5.5: Palmeras en el paseo de la playa Cavanca (Fuente Google Earth)***

#### 5.1.4 Edificaciones de evacuación vertical

Las edificaciones de evacuación vertical apuntan a la evacuación, como su nombre lo indica, más que a la mitigación de los efectos del tsunami. Son utilizados en zonas donde el tsunami arriba tempranamente o en zonas planas donde el tiempo de evacuación es muy pequeño.

En algunos casos estas edificaciones prestan otros servicios además de la evacuación, como puede ser un estacionamiento, mirador, entre otras.

Cuando ocurre un evento tsunamigénico el común de la población intenta evacuar en sus vehículos particulares lo que podría generar un atochamiento en las vías de evacuación lo que dificulta la evacuación horizontal, es en esos casos donde la evacuación vertical representa una mejor opción.

Como ya se mencionó las edificaciones de evacuación vertical pueden ser usados para otro propósito además de la evacuación, es el caso de las oficinas de gobierno en el puerto de Ishinomaki en Japón (Figura 5.6)



*Figura 5.6: Edificio de evacuación vertical (Modificado de Satreps, 2016)*

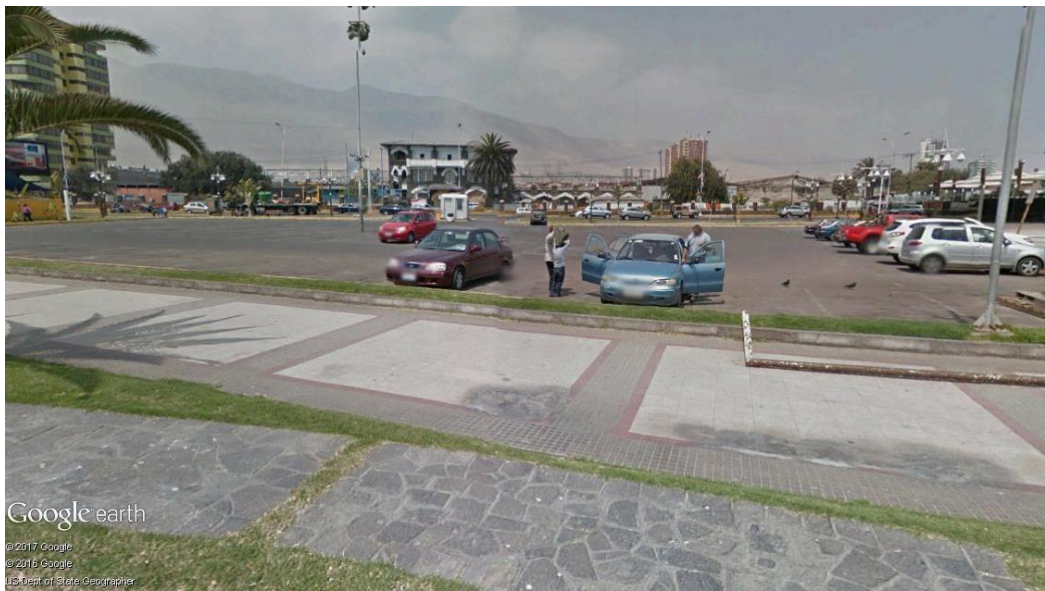
## 5.2 Aplicación práctica a la zona de Cavancho

Dado que la mayoría de las medidas de mitigación propuestas en párrafos anteriores requieren de un estudio más acabado para llegar a determinar su factibilidad, es que se presenta una aplicación práctica de una obra de evacuación vertical con su posible emplazamiento y algunas consideraciones adicionales.

En el año 2015, alumnos de intercambio de la Universidad de Delft realizaron un análisis exhaustivo de la situación de Iquique, abordando las falencias y virtudes que posee la ciudad de cara a sufrir un tsunami de gran envergadura. Abordaron la problemática mediante un análisis multidisciplinario, llegando a la conclusión que ninguna obra por si sola era suficiente sino que una combinación de obras hace la diferencia. Justamente por lo mismo es que en este subcapítulo se piensa en una obra de evacuación más que de mitigación para en un futuro implementarla en conjunto con, por ejemplo, un rompeolas o muro costero. Para mayor información referente al estudio ver “Assessment & mitigation proposal in case of major tsunami”

En el caso de Cavancho, justamente cerca de la costa existe una zona habilitada como estacionamiento para quienes disfrutan de la playa (Figura 5.7) la cual puede ser reacondicionada como un estacionamiento de por lo menos 3 pisos que puede ser eventualmente utilizado como edificación para evacuar verticalmente. Lo ideal sería dejar el primer piso libre de vehículos y utilizar los niveles superiores como estacionamiento.

El lugar donde se ubica este estacionamiento se inunda con una profundidad de aproximadamente 6 m (Ver figura en resultados) para el evento de magnitud  $M_w=9.0$ , dicho evento tiene un tiempo de arribo de 20 min, mientras que para los restantes eventos el tiempo de arribo es menor pero la inundación también es menor. Lo anterior hace factible la posibilidad de utilizar esa zona para evacuar.



***Figura 5.7: Ubicación estacionamiento en Cavancha (Fuente Google Earth)***

## 6 Conclusiones

El evento con magnitud de momento  $M_w=9.0$  generaría un tsunami que inundaría gran parte de la zona de Cavancha con una profundidad máxima de unos 6 metros en la zona más cercana a la costa. Dicho tsunami tiene una amplitud de onda de 7 metros, lo que implica que es un tsunami altamente destructivo sin considerar además el aporte destructivo del terremoto propiamente tal. Las medidas de mitigación propuestas para este escenario no lograron mitigar o aminorar los efectos que el tsunami tiene en la costa, los tiempos de arribo no se vieron afectados por la presencia del rompeolas y solo se aprecian sutiles cambios en el nivel del mar registrado por los mareógrafos, con lo cual se concluye que no son una medida de mitigación efectiva para este caso.

Posteriormente se probaron dos configuraciones de rompeolas (Tipo IV y V) pero esta vez con eventos tsunamigénicos de menor magnitud ( $M_w=8.0$ ; 8.2; 8.4) propuestos por el autor en base a la historia sísmica de la zona. El rompeolas tipo IV mostró ser una buena configuración puesto que en los tres escenarios disminuyó la profundidad de inundación entre 20 y 50 centímetros, no obstante esto no supone una disminución significativa para considerar que tuviese un real poder mitigador. Por otra parte la medida de mitigación solo afectó a las ondas que sucedieron a la primera y no fue un aporte en el retraso del tiempo de arribo de la onda. El rompeolas tipo V fue una configuración que tuvo el efecto contrario al buscado, puesto que en todos los escenarios simulados la configuración logró aumentar el nivel del mar registrado por el mareógrafo de Cavancha, las diferencias registradas rondan los 0.2 a 0.4 metros lo cual puede ser signo de un fenómeno de amplificación o resonancia presente en la bahía al incluir el rompeolas.

Como conclusión general del trabajo se puede decir que ninguna de las medidas de mitigación propuestas, independiente del escenario simulado, son efectivas a la hora de minimizar los daños o inundaciones generadas por el tsunami. Por lo anterior es que se debe pensar en realizar no una sino que una serie de obras de mitigación estructural, además éstas deben venir de la mano con medidas de mitigación no estructurales como planes de evacuación, mejoras en las señalizaciones de las vías de evacuación, realización de simulacros, etc. También pensar en el proceso posterior a la evacuación es importante porque muchas veces la población regresa a sus hogares sin esperar el anuncio de las autoridades lo que puede ser un error, puesto que ya se vio que existen ondas que arriban a los 90 o 120 minutos y que pueden ser de mayor magnitud.

## 7 Referencias

An, C., I. Sepúlveda & P.L.F. Liu. (2014). Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 41, doi:10.1002/2014GL060567.

Aránguiz, R., Shibayama, T. & Yamazaki, Y., 2014. Tsunamis from the Arica-Tocopilla source region and their effects on ports of Central Chile. *Nat Hazards*, pp. 175-202.

Aránguiz, R., Urra, L., Gonzalez, J., Jager, T., Wester, F., Smoor, A & Tiehatten, B., 2015. Numerical simulation of new proposed tsunami scenarios for Iquique, Chile. The Hague, the Netherlands, s.n.

Aránguiz, R. (2014). Analysis Of Tsunami Propagation in Coastal Areas-Lessons From Past Tsunamis. PhD Thesis. Waseda University. Japón.

Arikawa, T., Sato, M., Shimosako, K., Hasegawa, I., Yeom, G., Tomita, T. (2012). Failure Mechanism Of Kamaishi Breakwaters Due To The Great East Japan Earthquake Tsunami. *Coastal Engineering* 2012.

Barrientos, S., Vera, E., Alvarado, P., & Monfret, T. 2004. Crustal seismicity in central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(8), 759–768.

Béjar-Pizarro, M. et al. (2010) et al., Asperities and barriers on the seismogenic zone in North Chile: State-of-the-art after the 2007 Mw 7.7 Tocopilla earthquake inferred by GPS and InSAR data. *Geophys. Jour. Int.*,doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04748.x

Centro Sismológico Nacional (2013). Terremotos y sismicidad en Chile. Centro Sismológico Nacional. Universidad de Chile.

Centro Sismológico Nacional (2014). Informe Técnico Terremoto de Iquique, Mw 8.2. Universidad de Chile.

Comte, D. y M. Pardo (1991), Reappraisal of Great Historical Earthquakes in the Northern Chile and Southern Peru Seismic Gaps, *Natural Hazards* 4: 23-44, 1991.

Chlieh, M., et al. (2011), Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone, *J. Geophys. Res.*, 116, B12405, doi:10.1029/2010JB008166.

Davidson-Arnott, R. (2010). An introduction to coastal processes and geomorphology.

Giovanni, M.K., Beck, S.L. & Wagner, L (2002), The June 23, 2001 Peru earthquake and the southern Peru subduction zone, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 14–1, doi:10.1029/2002GL015774.

Hayes, G. P., M. W. Herman, W. D. Barnhart, K. P. Furlong, S. Riquelme, H. M. Benz, E. Bergman, S. Barrientos, P. S. Earle, and S. Samsonov (2014), Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake, *Nature*, 512(7514), 295-298, doi:10.1038/nature13677.

Imai, K., A. Hayashi, and F. Imamura, An investigation for trapping floating objects during tsunami due to align trees, *J. JSCE, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 68, No.2, pp.401-405, 2012. (in Japanese with English abstract).

Jannah, N. (2014). Disaster risk mitigation and prevention for science teacher. Nostre Phillippine.

Lay, T., H. Yue, E. E. Brodsky, and C. An (2014), The 1 April 2014 Iquique, Chile, Mw 8.1 earthquake rupture sequence, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3818–3825, doi:10.1002/2014GL060238.

Mansinha, L. & Smylie, D. E., 1971. The displacement fields of inclined faults. Bulletin of the Seismological Society of America, pp. 1433-1440.

Metois, M. et al. (2013) Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling, Geophys. Jour. Int.,doi: 10.1093/gji/ggt183.

Okada, Y., 1985. Surface deformation of shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, p. 1135 –1154.

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública – ONEMI. (2013). Informe Técnico de Evaluación. Simulacro Macrozona de Terremoto y Tsunami, Evacuación del Borde Costero. Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama. 8 de Agosto de 2013. Santiago, Chile.

Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B. and Karakaisis G. F. (2004). Global Relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes. Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, 2004.

Satreps. (2015). Guía para la estimación de peligros por Tsunami. Serie de publicaciones Vol. I. Chile.

Satreps. (2016). Tsunami Mitigation Measures Menu. Serie de publicaciones Vol. II. Chile.

Shibayama, T., Esteban, M., Ioan, N., Hiroshi, T., Nguyen, D., Ryo, M., Takahito, M., Aranguiz, R., Ravindra, J. & Koichiro, O., 2013. Classification of Tsunami and Evacuation Areas. pp. 365-386.

Tanimoto, K. Goda Y. (1992), “Stability of deep water caisson breakwater against random waves”. The Institution of Civil Engineers, London, Great Britain.

Tarback, E. & Lutgens, F., 2001: Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física [6ª ed.]- 540 págs. Prentice Hall, Madrid España.

Unesco, 2013. Unesco-IOC. Tsunami Glossary. IOC Information document No. 1221. Paris, UNESCO, 2006, actualizado 2013.

Unisdr, (2009). Terminología sobre reducción de riesgo de desastres 2009 para los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Urta, L., Mas, E., Aránguiz, R., Adriano, B., Koshimura, S. (2015). Estimación de daños por tsunami en Iquique, utilizando simulación numérica y curvas de fragilidad. XXII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Chile.

Van R., Aránguiz R., (2010). Effect of tsunami breakwater as a mitigation measures at the bay of Concepcion. Technical University of Delft, Holanda, and Maritime and Port Research Center (CIMP), Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.

Yagi, Y. et al., 2012. Rupture process of the 2014 Iquique Chile Earthquake in relation with the foreshock activity. Geophys. Res. Lett., Volume 41, p. 4201–4206.

Yagi, Y., Takahashi, T., Okumura, Y. & Aránguiz, R., 2014. Tsunami hazard estimation: Case of Iquique, in Seminar on Disaster Mitigation for Earthquake and Tsunami Countries of Latin America.

Yamazaki, Y., Cheung, K. F. & Kowalik, Z., 2009. Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up. International Journal for Numerical Methods in Fluids, p. 473–497.

Yamazaki, Y., Cheung, K. F. & Kowalik, Z., 2011. Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run-up. International Journal for Numerical Methods in Fluids, p. 2081–2107.

## 8 Anexos

### 8.1 Anexo 1: Escenario $M_w=9.0$ modificado de Yagi et al (2014)

No	Slip	Longitud	Latitud	dR	Largo	Ancho	Strike	Dip	Rake
1	1.07	-70.18987	-24.37596	51.3828	20	20	2	20	90
2	2.334	-70.37519	-24.36994	44.5424	20	20	2	20	90
3	6.272	-70.5604	-24.36392	37.702	20	20	2	20	90
4	5.772	-70.74572	-24.35779	30.8616	20	20	2	20	90
5	4.532	-70.93093	-24.35177	24.0212	20	20	2	20	90
6	4.168	-71.11624	-24.34574	17.1808	20	20	2	20	90
7	3.054	-71.30145	-24.33971	10.3404	20	20	2	20	90
8	2.462	-71.48676	-24.33358	3.5	20	20	2	20	90
9	7.21	-70.18283	-24.19537	51.3828	20	20	2	20	90
10	11.21	-70.36814	-24.18935	44.5424	20	20	2	20	90
11	12.158	-70.55336	-24.18333	37.702	20	20	2	20	90
12	10.996	-70.73867	-24.1772	30.8616	20	20	2	20	90
13	8.938	-70.92388	-24.17118	24.0212	20	20	2	20	90
14	8.12	-71.10919	-24.16515	17.1808	20	20	2	20	90
15	5.74	-71.2944	-24.15913	10.3404	20	20	2	20	90
16	3.894	-71.47971	-24.153	3.5	20	20	2	20	90
17	8.46	-70.17588	-24.01479	51.3828	20	20	2	20	90
18	13.542	-70.3611	-24.00876	44.5424	20	20	2	20	90
19	14.16	-70.54641	-24.00274	37.702	20	20	2	20	90
20	13.846	-70.73162	-23.99662	30.8616	20	20	2	20	90
21	12.62	-70.91693	-23.9906	24.0212	20	20	2	20	90
22	11.128	-71.10214	-23.98457	17.1808	20	20	2	20	90
23	7.66	-71.28745	-23.97854	10.3404	20	20	2	20	90
24	4.57	-71.47265	-23.97242	3.5	20	20	2	20	90
25	9.29	-70.16884	-23.8342	51.3828	20	20	2	20	90
26	13.82	-70.35405	-23.82818	44.5424	20	20	2	20	90
27	14.352	-70.53936	-23.82216	37.702	20	20	2	20	90
28	14.33	-70.72457	-23.81603	30.8616	20	20	2	20	90
29	14.18	-70.90988	-23.81001	24.0212	20	20	2	20	90
30	13.656	-71.09509	-23.80399	17.1808	20	20	2	20	90
31	10.954	-71.2804	-23.79786	10.3404	20	20	2	20	90
32	6.828	-71.4656	-23.79184	3.5	20	20	2	20	90
33	9.56	-70.1618	-23.65361	51.3828	20	20	2	20	90
34	13.862	-70.34701	-23.64759	44.5424	20	20	2	20	90

35	14.352	-70.53232	-23.64157	37.702	20	20	2	20	90
36	14.352	-70.71753	-23.63545	30.8616	20	20	2	20	90
37	14.352	-70.90284	-23.62942	24.0212	20	20	2	20	90
38	14.166	-71.08804	-23.6234	17.1808	20	20	2	20	90
39	12.538	-71.27335	-23.61728	10.3404	20	20	2	20	90
40	8.29	-71.45856	-23.61125	3.5	20	20	2	20	90
41	9.966	-70.15476	-23.47302	51.3828	20	20	2	20	90
42	13.398	-70.34007	-23.467	44.5424	20	20	2	20	90
43	13.816	-70.52528	-23.46088	37.702	20	20	2	20	90
44	14.278	-70.71058	-23.45486	30.8616	20	20	2	20	90
45	14.352	-70.89579	-23.44884	24.0212	20	20	2	20	90
46	14.33	-71.0811	-23.44282	17.1808	20	20	2	20	90
47	13.636	-71.2663	-23.43669	10.3404	20	20	2	20	90
48	9.408	-71.45161	-23.43067	3.5	20	20	2	20	90
49	7.94	-70.14772	-23.29243	51.3828	20	20	2	20	90
50	10.048	-70.33303	-23.28641	44.5424	20	20	2	20	90
51	10.76	-70.51824	-23.28029	37.702	20	20	2	20	90
52	13.86	-70.70354	-23.27427	30.8616	20	20	2	20	90
53	14.352	-70.88875	-23.26825	24.0212	20	20	2	20	90
54	14.302	-71.07405	-23.26223	17.1808	20	20	2	20	90
55	13.454	-71.25926	-23.25611	10.3404	20	20	2	20	90
56	9.222	-71.44456	-23.25009	3.5	20	20	2	20	90
57	8.386	-70.14078	-23.11184	51.3828	20	20	2	20	90
58	9.64	-70.32599	-23.10583	44.5424	20	20	2	20	90
59	10.276	-70.5113	-23.09971	37.702	20	20	2	20	90
60	13.794	-70.6965	-23.09369	30.8616	20	20	2	20	90
61	14.352	-70.88181	-23.08767	24.0212	20	20	2	20	90
62	14.02	-71.06701	-23.08165	17.1808	20	20	2	20	90
63	11.558	-71.25231	-23.07553	10.3404	20	20	2	20	90
64	7.292	-71.43752	-23.06951	3.5	20	20	2	20	90
65	8.372	-70.13374	-22.93125	51.3828	20	20	2	20	90
66	9.638	-70.31895	-22.92524	44.5424	20	20	2	20	90
67	10.276	-70.50426	-22.91912	37.702	20	20	2	20	90
68	13.794	-70.68946	-22.9131	30.8616	20	20	2	20	90
69	14.352	-70.87477	-22.90708	24.0212	20	20	2	20	90
70	13.976	-71.05997	-22.90106	17.1808	20	20	2	20	90
71	11.282	-71.24527	-22.89494	10.3404	20	20	2	20	90
72	7.132	-71.43047	-22.88892	3.5	20	20	2	20	90
73	7.424	-70.12671	-22.75066	51.3828	20	20	2	20	90

74	9.488	-70.31191	-22.74465	44.5424	20	20	2	20	90
75	10.276	-70.49722	-22.73853	37.702	20	20	2	20	90
76	13.794	-70.68242	-22.73252	30.8616	20	20	2	20	90
77	14.352	-70.86773	-22.7265	24.0212	20	20	2	20	90
78	13.976	-71.05293	-22.72048	17.1808	20	20	2	20	90
79	11.424	-71.23823	-22.71436	10.3404	20	20	2	20	90
80	7.958	-71.42343	-22.70834	3.5	20	20	2	20	90
81	6.346	-70.11967	-22.57008	51.3828	20	20	2	20	90
82	9.318	-70.30498	-22.56406	44.5424	20	20	2	20	90
83	10.276	-70.49018	-22.55795	37.702	20	20	2	20	90
84	13.794	-70.67549	-22.55193	30.8616	20	20	2	20	90
85	14.352	-70.86069	-22.54591	24.0212	20	20	2	20	90
86	13.976	-71.04599	-22.53989	17.1808	20	20	2	20	90
87	11.446	-71.23119	-22.53378	10.3404	20	20	2	20	90
88	8.09	-71.41649	-22.52776	3.5	20	20	2	20	90
89	5.27	-70.11264	-22.38949	51.3828	20	20	2	20	90
90	9.146	-70.29795	-22.38347	44.5424	20	20	2	20	90
91	10.276	-70.48315	-22.37736	37.702	20	20	2	20	90
92	13.794	-70.66845	-22.37134	30.8616	20	20	2	20	90
93	14.352	-70.85365	-22.36533	24.0212	20	20	2	20	90
94	14	-71.03895	-22.35921	17.1808	20	20	2	20	90
95	11.588	-71.22415	-22.35319	10.3404	20	20	2	20	90
96	8.114	-71.40945	-22.34717	3.5	20	20	2	20	90
97	3.886	-70.10571	-22.2089	51.3828	20	20	2	20	90
98	8.79	-70.29091	-22.20278	44.5424	20	20	2	20	90
99	10.254	-70.47622	-22.19677	37.702	20	20	2	20	90
100	13.794	-70.66142	-22.19076	30.8616	20	20	2	20	90
101	14.352	-70.84672	-22.18474	24.0212	20	20	2	20	90
102	14.166	-71.03192	-22.17863	17.1808	20	20	2	20	90
103	12.56	-71.21722	-22.17261	10.3404	20	20	2	20	90
104	8.42	-71.40241	-22.16659	3.5	20	20	2	20	90
105	1.738	-70.09868	-22.02831	51.3828	20	20	2	20	90
106	8.194	-70.28388	-22.0222	44.5424	20	20	2	20	90
107	10.66	-70.46918	-22.01618	37.702	20	20	2	20	90
108	13.868	-70.65439	-22.01017	30.8616	20	20	2	20	90
109	14.352	-70.83969	-22.00416	24.0212	20	20	2	20	90
110	14.33	-71.02488	-21.99804	17.1808	20	20	2	20	90
111	13.612	-71.21018	-21.99202	10.3404	20	20	2	20	90
112	9.264	-71.39538	-21.98601	3.5	20	20	2	20	90

113	4.292	-70.09165	-21.84772	51.3828	20	20	2	20	90
114	11.504	-70.27685	-21.84161	44.5424	20	20	2	20	90
115	13.698	-70.46215	-21.8356	37.702	20	20	2	20	90
116	14.286	-70.64735	-21.82958	30.8616	20	20	2	20	90
117	14.352	-70.83265	-21.82357	24.0212	20	20	2	20	90
118	14.328	-71.01785	-21.81746	17.1808	20	20	2	20	90
119	13.48	-71.20315	-21.81144	10.3404	20	20	2	20	90
120	8.564	-71.38834	-21.80542	3.5	20	20	2	20	90
121	3.81	-70.08462	-21.66713	51.3828	20	20	2	20	90
122	11.768	-70.26992	-21.66102	44.5424	20	20	2	20	90
123	14.158	-70.45512	-21.65501	37.702	20	20	2	20	90
124	14.352	-70.64042	-21.649	30.8616	20	20	2	20	90
125	14.352	-70.82562	-21.64298	24.0212	20	20	2	20	90
126	14.186	-71.01092	-21.63687	17.1808	20	20	2	20	90
127	12.65	-71.19611	-21.63086	10.3404	20	20	2	20	90
128	8.296	-71.38141	-21.62484	3.5	20	20	2	20	90
129	3.016	-70.0776	-21.48654	51.3828	20	20	2	20	90
130	10.858	-70.2629	-21.48043	44.5424	20	20	2	20	90
131	14.032	-70.4481	-21.47442	37.702	20	20	2	20	90
132	14.352	-70.6334	-21.46841	30.8616	20	20	2	20	90
133	14.352	-70.81859	-21.4624	24.0212	20	20	2	20	90
134	14.188	-71.00389	-21.45629	17.1808	20	20	2	20	90
135	12.664	-71.18908	-21.45027	10.3404	20	20	2	20	90
136	8.298	-71.37438	-21.44426	3.5	20	20	2	20	90
137	4.788	-70.07067	-21.30595	51.3828	20	20	2	20	90
138	11.152	-70.25587	-21.29984	44.5424	20	20	2	20	90
139	14.034	-70.44117	-21.29383	37.702	20	20	2	20	90
140	14.352	-70.62637	-21.28782	30.8616	20	20	2	20	90
141	14.352	-70.81166	-21.28181	24.0212	20	20	2	20	90
142	14.33	-70.99686	-21.2757	17.1808	20	20	2	20	90
143	13.496	-71.18215	-21.26969	10.3404	20	20	2	20	90
144	8.58	-71.36735	-21.26367	3.5	20	20	2	20	90
145	6.966	-70.06365	-21.12536	51.3828	20	20	2	20	90
146	12.418	-70.24885	-21.11925	44.5424	20	20	2	20	90
147	14.184	-70.43415	-21.11325	37.702	20	20	2	20	90
148	14.352	-70.61934	-21.10724	30.8616	20	20	2	20	90
149	14.352	-70.80464	-21.10113	24.0212	20	20	2	20	90
150	14.328	-70.98983	-21.09512	17.1808	20	20	2	20	90
151	13.598	-71.17512	-21.0891	10.3404	20	20	2	20	90

152	9.26	-71.36032	-21.08309	3.5	20	20	2	20	90
153	8.334	-70.05663	-20.94477	51.3828	20	20	2	20	90
154	13.544	-70.24183	-20.93867	44.5424	20	20	2	20	90
155	14.332	-70.42712	-20.93266	37.702	20	20	2	20	90
156	14.328	-70.61232	-20.92665	30.8616	20	20	2	20	90
157	14.21	-70.79761	-20.92054	24.0212	20	20	2	20	90
158	14.164	-70.9828	-20.91453	17.1808	20	20	2	20	90
159	12.648	-71.1681	-20.90852	10.3404	20	20	2	20	90
160	8.282	-71.35329	-20.90251	3.5	20	20	2	20	90
161	9.29	-70.04961	-20.76408	51.3828	20	20	2	20	90
162	13.82	-70.2349	-20.75808	44.5424	20	20	2	20	90
163	14.302	-70.4201	-20.75207	37.702	20	20	2	20	90
164	13.854	-70.60539	-20.74606	30.8616	20	20	2	20	90
165	13.026	-70.79059	-20.73995	24.0212	20	20	2	20	90
166	13.636	-70.97588	-20.73394	17.1808	20	20	2	20	90
167	12.004	-71.16107	-20.72793	10.3404	20	20	2	20	90
168	7.108	-71.34636	-20.72192	3.5	20	20	2	20	90
169	9.418	-70.04259	-20.58349	51.3828	20	20	2	20	90
170	13.84	-70.22788	-20.57749	44.5424	20	20	2	20	90
171	14.02	-70.41308	-20.57148	37.702	20	20	2	20	90
172	11.934	-70.59837	-20.56548	30.8616	20	20	2	20	90
173	10.746	-70.78356	-20.55937	24.0212	20	20	2	20	90
174	11.29	-70.96885	-20.55336	17.1808	20	20	2	20	90
175	8.882	-71.15404	-20.54735	10.3404	20	20	2	20	90
176	5.126	-71.33933	-20.54134	3.5	20	20	2	20	90
177	8.92	-70.03557	-20.4029	51.3828	20	20	2	20	90
178	13.35	-70.22086	-20.3969	44.5424	20	20	2	20	90
179	13.71	-70.40606	-20.39089	37.702	20	20	2	20	90
180	10.33	-70.59135	-20.38489	30.8616	20	20	2	20	90
181	9.04	-70.77654	-20.37878	24.0212	20	20	2	20	90
182	8.674	-70.96183	-20.37277	17.1808	20	20	2	20	90
183	2.168	-71.14702	-20.36677	10.3404	20	20	2	20	90
184	0.676	-71.33231	-20.36076	3.5	20	20	2	20	90
185	5.336	-70.02865	-20.22231	51.3828	20	20	2	20	90
186	9.218	-70.21385	-20.21631	44.5424	20	20	2	20	90
187	10.628	-70.39914	-20.21031	37.702	20	20	2	20	90
188	2.66	-70.58433	-20.2043	30.8616	20	20	2	20	90
189	1.236	-70.76962	-20.1982	24.0212	20	20	2	20	90
190	1.164	-70.95481	-20.19219	17.1808	20	20	2	20	90

191	0.162	-71.1401	-20.18618	10.3404	20	20	2	20	90
192	0	-71.32529	-20.18007	3.5	20	20	2	20	90
193	0	-69.3433	-19.61702	78.5	20	20	336	20	90
194	0	-69.50913	-19.68698	72.3197	20	20	336	20	90
195	0.044	-69.67497	-19.75683	66.1393	20	20	336	20	90
196	0.574	-69.84081	-19.82679	59.959	20	20	336	20	90
197	2.076	-70.00665	-19.89664	53.7786	20	20	336	20	90
198	5.67	-70.1725	-19.96659	47.5983	20	20	336	20	90
199	10.142	-70.33834	-20.03654	41.418	20	20	336	20	90
200	13.036	-70.50418	-20.10639	35.2376	20	20	336	20	90
201	12.71	-70.67002	-20.17634	29.0573	20	20	336	20	90
202	10.162	-70.83587	-20.24619	22.8769	20	20	336	20	90
203	5.716	-71.00161	-20.31613	16.6966	20	20	336	20	90
204	2.642	-71.16746	-20.38608	10.5163	20	20	336	20	90
205	1.872	-71.3333	-20.45592	4.3359	20	20	336	20	90
206	0	-69.4209	-19.4518	78.5	20	20	336	20	90
207	0	-69.58674	-19.52166	72.3197	20	20	336	20	90
208	0.662	-69.75258	-19.59162	66.1393	20	20	336	20	90
209	1.89	-69.91842	-19.66157	59.959	20	20	336	20	90
210	4.276	-70.08426	-19.73142	53.7786	20	20	336	20	90
211	7.79	-70.25	-19.80137	47.5983	20	20	336	20	90
212	11.516	-70.41584	-19.87122	41.418	20	20	336	20	90
213	13.728	-70.58168	-19.94117	35.2376	20	20	336	20	90
214	14.232	-70.74752	-20.01112	29.0573	20	20	336	20	90
215	13.724	-70.91337	-20.08097	22.8769	20	20	336	20	90
216	11.55	-71.07921	-20.15091	16.6966	20	20	336	20	90
217	6.354	-71.24505	-20.22076	10.5163	20	20	336	20	90
218	1.848	-71.4109	-20.2907	4.3359	20	20	336	20	90
219	0	-69.49841	-19.28659	78.5	20	20	336	20	90
220	0.202	-69.66425	-19.35644	72.3197	20	20	336	20	90
221	2.158	-69.83009	-19.4264	66.1393	20	20	336	20	90
222	5.266	-69.99592	-19.49625	59.959	20	20	336	20	90
223	7.296	-70.16176	-19.5662	53.7786	20	20	336	20	90
224	10.136	-70.3276	-19.63616	47.5983	20	20	336	20	90
225	13.386	-70.49344	-19.70601	41.418	20	20	336	20	90
226	14.174	-70.65928	-19.77596	35.2376	20	20	336	20	90
227	14.332	-70.82512	-19.8458	29.0573	20	20	336	20	90
228	13.576	-70.99096	-19.91575	22.8769	20	20	336	20	90
229	10.528	-71.1568	-19.98569	16.6966	20	20	336	20	90

230	4.896	-71.32265	-20.05554	10.5163	20	20	336	20	90
231	0.928	-71.48849	-20.12548	4.3359	20	20	336	20	90
232	0	-69.57602	-19.12127	78.5	20	20	336	20	90
233	0.672	-69.74186	-19.19123	72.3197	20	20	336	20	90
234	3.562	-69.90769	-19.26118	66.1393	20	20	336	20	90
235	8.028	-70.07353	-19.33104	59.959	20	20	336	20	90
236	10.138	-70.23937	-19.40099	53.7786	20	20	336	20	90
237	12.248	-70.4052	-19.47084	47.5983	20	20	336	20	90
238	14.294	-70.57104	-19.54079	41.418	20	20	336	20	90
239	14.352	-70.73688	-19.61074	35.2376	20	20	336	20	90
240	13.906	-70.90272	-19.68058	29.0573	20	20	336	20	90
241	11.776	-71.06856	-19.75053	22.8769	20	20	336	20	90
242	7.616	-71.2344	-19.82038	16.6966	20	20	336	20	90
243	2.484	-71.40014	-19.89032	10.5163	20	20	336	20	90
244	0.016	-71.56598	-19.96026	4.3359	20	20	336	20	90
245	0.044	-69.65363	-18.95605	78.5	20	20	336	20	90
246	0.76	-69.81946	-19.02601	72.3197	20	20	336	20	90
247	3.218	-69.9853	-19.09586	66.1393	20	20	336	20	90
248	7.412	-70.15113	-19.16582	59.959	20	20	336	20	90
249	10.708	-70.31697	-19.23577	53.7786	20	20	336	20	90
250	13.298	-70.4828	-19.30562	47.5983	20	20	336	20	90
251	14.206	-70.64854	-19.37557	41.418	20	20	336	20	90
252	14.032	-70.81438	-19.44542	35.2376	20	20	336	20	90
253	13.346	-70.98022	-19.51537	29.0573	20	20	336	20	90
254	9.692	-71.14606	-19.58531	22.8769	20	20	336	20	90
255	4.2	-71.3119	-19.65516	16.6966	20	20	336	20	90
256	0.856	-71.47774	-19.7251	10.5163	20	20	336	20	90
257	0	-71.64358	-19.79494	4.3359	20	20	336	20	90
258	0.18	-69.73114	-18.79084	78.5	20	20	336	20	90
259	0.516	-69.89697	-18.86079	72.3197	20	20	336	20	90
260	2.134	-70.0628	-18.93065	66.1393	20	20	336	20	90
261	5.264	-70.22864	-19.0006	59.959	20	20	336	20	90
262	8.738	-70.39447	-19.07045	53.7786	20	20	336	20	90
263	10.568	-70.5603	-19.1404	47.5983	20	20	336	20	90
264	11.492	-70.72614	-19.21035	41.418	20	20	336	20	90
265	12.244	-70.89198	-19.2802	35.2376	20	20	336	20	90
266	12.216	-71.05781	-19.35015	29.0573	20	20	336	20	90
267	8.15	-71.22365	-19.41999	22.8769	20	20	336	20	90
268	2.398	-71.38949	-19.48994	16.6966	20	20	336	20	90

269	0	-71.55533	-19.55988	10.5163	20	20	336	20	90
270	0	-71.72117	-19.62972	4.3359	20	20	336	20	90
271	1.736	-69.80874	-18.62562	78.5	20	20	336	20	90
272	2.462	-69.97457	-18.69548	72.3197	20	20	336	20	90
273	1.93	-70.14041	-18.76543	66.1393	20	20	336	20	90
274	3.258	-70.30624	-18.83538	59.959	20	20	336	20	90
275	4.82	-70.47207	-18.90524	53.7786	20	20	336	20	90
276	5.394	-70.6379	-18.97519	47.5983	20	20	336	20	90
277	7.5	-70.80374	-19.04504	41.418	20	20	336	20	90
278	8.836	-70.96957	-19.11498	35.2376	20	20	336	20	90
279	8.42	-71.13541	-19.18493	29.0573	20	20	336	20	90
280	5.058	-71.30125	-19.25478	22.8769	20	20	336	20	90
281	1.032	-71.46708	-19.32472	16.6966	20	20	336	20	90
282	0	-71.63292	-19.39456	10.5163	20	20	336	20	90
283	0	-71.79866	-19.46451	4.3359	20	20	336	20	90
284	3.29	-69.88635	-18.46041	78.5	20	20	336	20	90
285	3.18	-70.05218	-18.53026	72.3197	20	20	336	20	90
286	1.202	-70.21801	-18.60021	66.1393	20	20	336	20	90
287	0.724	-70.38384	-18.67007	59.959	20	20	336	20	90
288	0.922	-70.54967	-18.74002	53.7786	20	20	336	20	90
289	1.46	-70.7155	-18.80997	47.5983	20	20	336	20	90
290	3.932	-70.88134	-18.87982	41.418	20	20	336	20	90
291	5.502	-71.04707	-18.94977	35.2376	20	20	336	20	90
292	4.836	-71.21291	-19.01961	29.0573	20	20	336	20	90
293	1.772	-71.37874	-19.08956	22.8769	20	20	336	20	90
294	0	-71.54458	-19.1595	16.6966	20	20	336	20	90
295	0	-71.71041	-19.22935	10.5163	20	20	336	20	90
296	0	-71.87625	-19.29929	4.3359	20	20	336	20	90
297	2.882	-69.96385	-18.29509	78.5	20	20	336	20	90
298	2.202	-70.12968	-18.36504	72.3197	20	20	336	20	90
299	0.234	-70.29551	-18.435	66.1393	20	20	336	20	90
300	0.146	-70.46134	-18.50485	59.959	20	20	336	20	90
301	1.168	-70.62717	-18.5748	53.7786	20	20	336	20	90
302	2.092	-70.793	-18.64465	47.5983	20	20	336	20	90
303	2.836	-70.95883	-18.7146	41.418	20	20	336	20	90
304	3.294	-71.12467	-18.78455	35.2376	20	20	336	20	90
305	2.26	-71.2905	-18.8544	29.0573	20	20	336	20	90
306	0.49	-71.45633	-18.92434	22.8769	20	20	336	20	90
307	0	-71.62217	-18.99418	16.6966	20	20	336	20	90

308	0	-71.788	-19.06413	10.5163	20	20	336	20	90
309	0	-71.95384	-19.13407	4.3359	20	20	336	20	90
310	0.992	-70.04146	-18.12987	78.5	20	20	336	20	90
311	0.674	-70.20728	-18.19983	72.3197	20	20	336	20	90
312	0.006	-70.37311	-18.26968	66.1393	20	20	336	20	90
313	0.604	-70.53894	-18.33963	59.959	20	20	336	20	90
314	2.14	-70.70477	-18.40959	53.7786	20	20	336	20	90
315	3.95	-70.8706	-18.47944	47.5983	20	20	336	20	90
316	4.296	-71.03643	-18.54938	41.418	20	20	336	20	90
317	2.858	-71.20226	-18.61923	35.2376	20	20	336	20	90
318	0.892	-71.3681	-18.68918	29.0573	20	20	336	20	90
319	0	-71.53393	-18.75912	22.8769	20	20	336	20	90
320	0	-71.69976	-18.82897	16.6966	20	20	336	20	90
321	0	-71.86559	-18.89891	10.5163	20	20	336	20	90
322	0	-72.03143	-18.96875	4.3359	20	20	336	20	90
323	0	-70.11906	-17.96466	78.5	20	20	336	20	90
324	0.008	-70.28489	-18.03461	72.3197	20	20	336	20	90
325	0.052	-70.45071	-18.10447	66.1393	20	20	336	20	90
326	0.714	-70.61654	-18.17442	59.959	20	20	336	20	90
327	1.666	-70.78237	-18.24427	53.7786	20	20	336	20	90
328	4.082	-70.9482	-18.31422	47.5983	20	20	336	20	90
329	4.632	-71.11403	-18.38417	41.418	20	20	336	20	90
330	2.33	-71.27976	-18.45401	35.2376	20	20	336	20	90
331	0.346	-71.44559	-18.52396	29.0573	20	20	336	20	90
332	0	-71.61142	-18.59381	22.8769	20	20	336	20	90
333	0	-71.77725	-18.66375	16.6966	20	20	336	20	90
334	0	-71.94308	-18.73369	10.5163	20	20	336	20	90
335	0	-72.10892	-18.80353	4.3359	20	20	336	20	90