

# **INFORME TÉCNICO**

**EVENTO CHILOE M 7.6  
25 DE DICIEMBRE DE 2016**

## TERREMOTO CHILOÉ, CHILE 25/12/2016

### 1. Contexto Sismo tectónico regional

La sismicidad de Chile se encuentra principalmente dominada por la convergencia entre la placa de Nazca y placa Sudamericana, a razón de 6.5 cm/año. Hacia el sur de la Península de Taitao, es la placa Antártica la que penetra bajo la placa Sudamericana a aproximadamente 1.8 cm/año. En la zona austral, la Falla de Magallanes -que coincide con el Estrecho de Magallanes en su sector occidental y continúa hacia el oriente a lo largo del Lago Fagnano- acomoda el movimiento de rumbo sinistral, del orden de 0.7 cm/año, entre las placas de Escocia y Sudamérica (Barrientos, 2016).

La gran velocidad de convergencia relativa entre las placas de Nazca y Sudamérica es la responsable de, no solamente la alta productividad sísmica que es una de las mayores del planeta, sino también de las grandes dimensiones que los terremotos alcanzan en esta región (Barrientos, 2016).

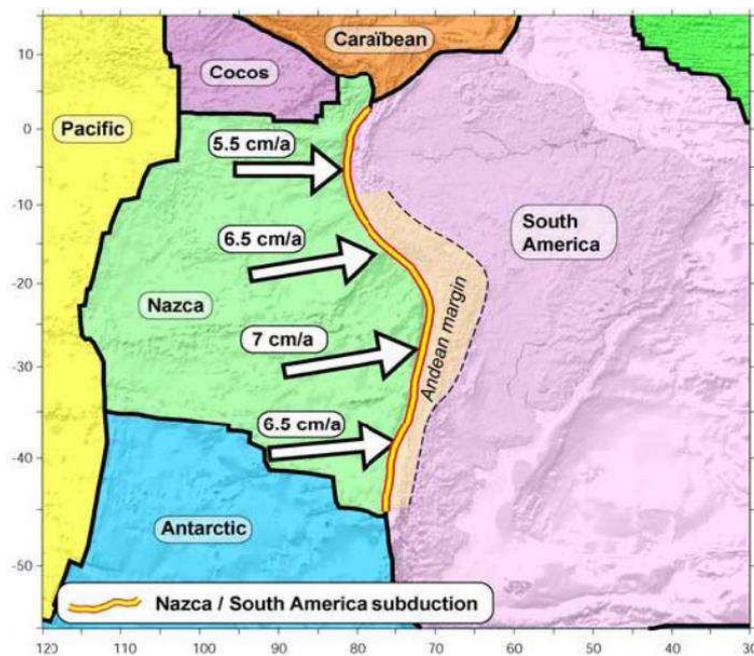


Figura 1. Contexto tectónico de América del Sur. La placa de Nazca converge y se desplaza bajo la placa Sudamericana el equivalente a unos 6 a 7 cm cada año. Más al sur, la placa Antártica lo hace a 1.8 cm por año. En el extremo sur es la placa de Escocia la que interactúa con la placa Sudamericana (Fuente: S. Barrientos, 2016: preparada por C. Vigny, 2007).

La mayor parte de la deformación asociada a la convergencia de las placas Sudamericana y Nazca es absorbida en la zona de contacto entre estas, lo

que se ve evidenciado con la alta tasa de sismicidad que se observa en esta zona. Esta alta tasa de sismicidad además es reflejada por la frecuente ocurrencia, en términos geológicos, de grandes sismos ( $M_w > 7.5$ ) generados en dicha interfase.

En la Figura 2 se muestran los sismos mayores a una magnitud de 7.5 que se han registrado históricamente en el margen chileno. En esta figura se distingue una tendencia general de sentido norte a sur de sucesión de las rupturas sísmicas, en lo que podría denominarse como frente de ruptura (Barrientos, 1994). En la figura también se aprecia que las rupturas se repiten, y abarcan aproximadamente los mismos lugares o segmentos cada vez, lo que ha llevado a la incorporación del concepto de segmentos sísmicos (Rauld, 2011). Se observa también, la ocurrencia de sismos excepcionalmente grandes, con largos de ruptura mayores a 400 km, que no se han repetido más de dos veces a la misma latitud en el registro histórico.

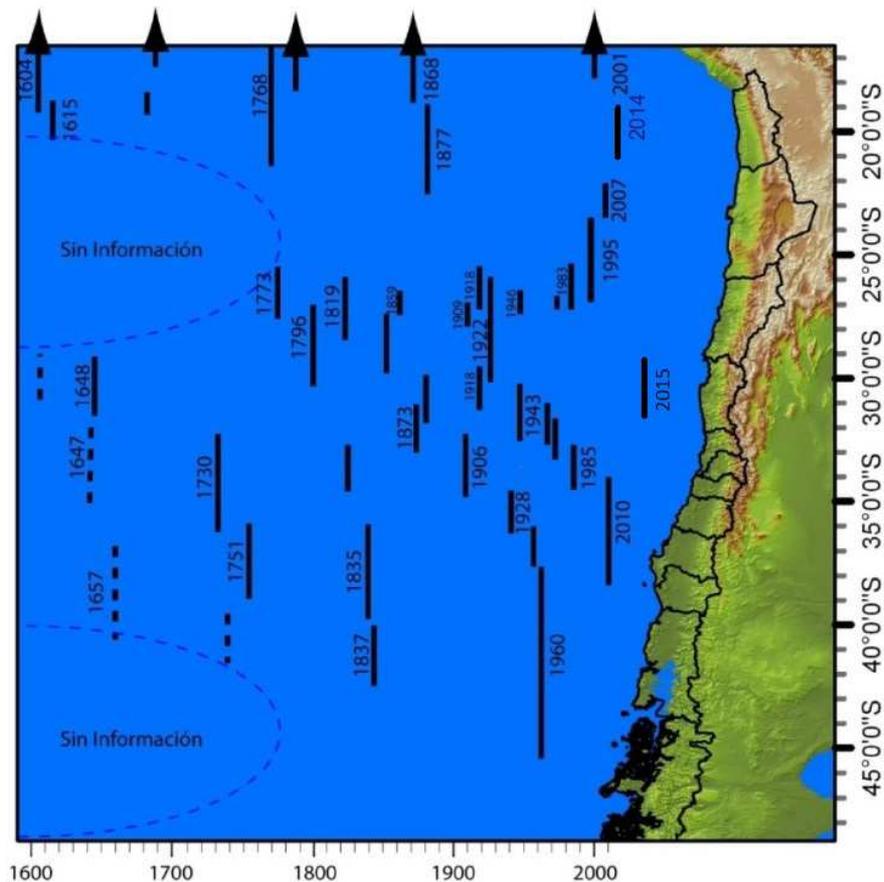


Figura 2. Sismos interplaca históricos con magnitud estimada o calculada mayor a 7.2, y sus áreas de ruptura estimadas. Las líneas continuas señalan las zonas de ruptura bien delimitadas y las líneas discontinuas las zonas de ruptura inciertas (Fuente R. Rauld, 2011; modificada SHOA 2016).

La historia sísmica del sur de Chile, escasamente documentada, registra la ocurrencia de cuatro eventos importantes, el 16 de diciembre de 1575, 24 de diciembre de 1737, 7 de noviembre 1837 y el 22 de mayo del año 1960. Los efectos reportados del terremoto de 1575 son los que más se asemejan a los de 1960. Conquistadores, ubicados en fuertes en el límite norte del área de ruptura de 1960, escribieron acerca de persistentes inundaciones marinas cerca de Imperial, Valdivia y Castro que implicaba un amplia y extendida subsidencia tectónica. Ellos también describieron un devastador tsunami cerca de Valdivia. El terremoto de 1737, conocido solamente por fuentes secundarias, dañó las pocas colonias españolas que permanecían al sur de Concepción. El terremoto de 1837, dañó pueblos a lo largo del tercio central del área de ruptura de 1960 y cambio los niveles de las tierras a lo largo de la mitad sur de esa área. Este terremoto, tiene asociado un tsunami, con reportes de alturas de 6 m en Hawaii, lo cual da evidencia de que el terremoto de 1837 liberó casi la mitad del momento sísmico que el terremoto de 1960.

El día 25 de diciembre de 2016 a las 11:22 HL (14:22 UTC), se produjo un sismo de magnitud 7.6 Mw con epicentro ubicado en los 43.517° S; 74.391° W a una profundidad de 30 Km y a 67 km al NW de la localidad de Melinka. La mayor intensidad reportada por ONEMI fue en la ciudad de Puerto Montt con VII Mercalli. Este sismo generó un tsunami instrumental que fue registrado en las estaciones de nivel del mar de Corral, Bahía Mansa, Ancud, Castro y Melinka, sin reportes efectos destructivos en el borde costero.

## 2. Antecedentes sísmicos evento 25 de diciembre 2016

Tabla 1: Reporte del sismo emitido por el Centro Sismológico Nacional (CSN)

<b>Magnitud</b>	7.6 (Mw)
<b>Fecha – Hora</b>	25 de Diciembre de 2016 a las 11:22 hora local (14:22 UTC)
<b>Epicentro</b>	43.517°S; 74.391°W
<b>Profundidad</b>	30 Km
<b>Referencia Geográfica</b>	67 km al NW de Melinka.
<b>Región</b>	De los Lagos
<b>Fuente</b>	Centro Sismológico Nacional (CSN)



Figura 3. Mapa de localización del epicentro del sismo en Chiloé, Chile. (Fuente: CSN)

El mecanismo focal indica la geometría del plano de falla asociado a un terremoto, la dirección de los ejes principales de esfuerzo en el foco y el patrón de radiación de las ondas P y S. El mecanismo focal para el sismo ocurrido el 25 de diciembre de 2016, obtenido por el Centro Sismológico

Nacional, el determinado por el US Geological Survey y el calculado por el GFZ GEOFON (Figuras 4, 5 y 6).

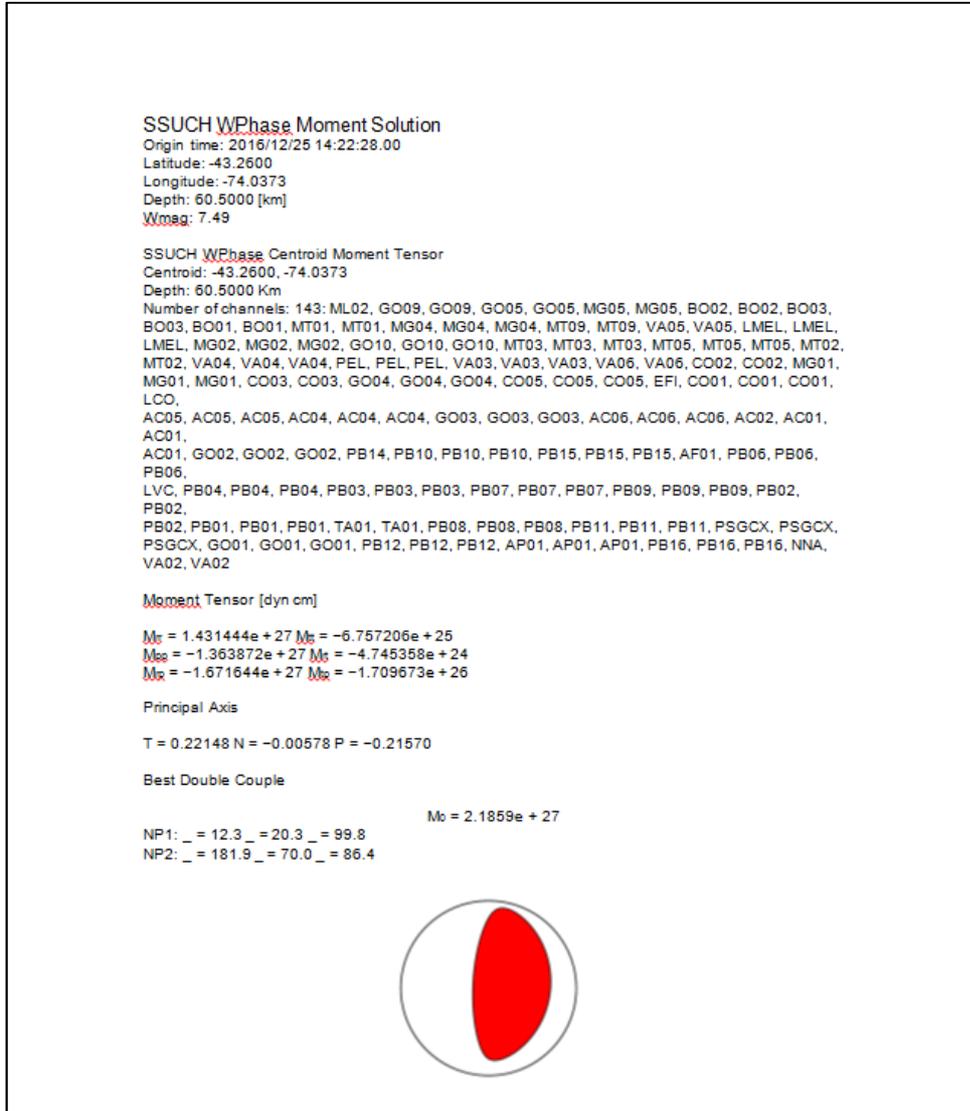
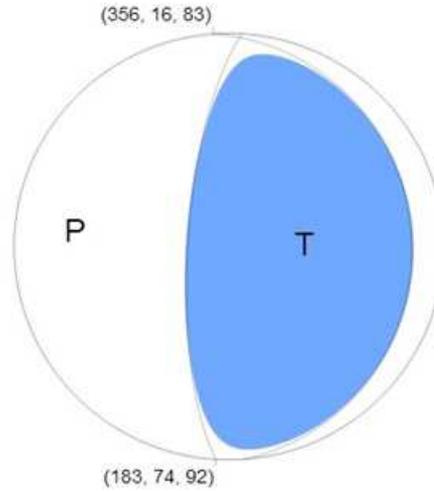


Figura 4. Mecanismo focal del sismo en Chiloé, Chile. (Fuente: CSN).

La geometría de la falla -o mecanismo de foco- que origina este sismo y su ubicación son consistentes con la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Estimaciones preliminares, basadas en relaciones de escala- indican que la longitud de ruptura alcanza a unos 60 km con un deslizamiento medio en la falla de alrededor 2 m. (Barrientos, 2016).

### W-phase Moment Tensor (Mww)

<b>Moment</b>	3.383e+20 N-m
<b>Magnitude</b>	7.6 Mww
<b>Depth</b>	21.5 km
<b>Percent DC</b>	94 %
<b>Half Duration</b>	15 s
<b>Catalog</b>	US
<b>Data Source</b>	<a href="#">US<sup>3</sup></a>
<b>Contributor</b>	<a href="#">US<sup>3</sup></a>



### Nodal Planes

Plane	Strike	Dip	Rake
NP1	356°	16°	83°
NP2	183°	74°	92°

### Principal Axes

Axis	Value	Plunge	Azimuth
T	3.431e+20 N-m	61°	96°
N	-0.097e+20 N-m	2°	3°
P	-3.332e+20 N-m	29°	272°

Figura 5. Mecanismo focal del sismo en Chiloé, Chile. (Fuente: USGS).

El momento sísmico relaciona los parámetros fundamentales del proceso de ruptura (largo, ancho, desplazamiento medio, rigidez del medio) siendo la medida más consistente para estimar el tamaño del terremoto. La estimación de este parámetro para el sismo de Chiloé fluctuó entre  $2.8e+20$  N-m (GFZ GEOFON) y  $3.430e+20$  N-m (CSN).



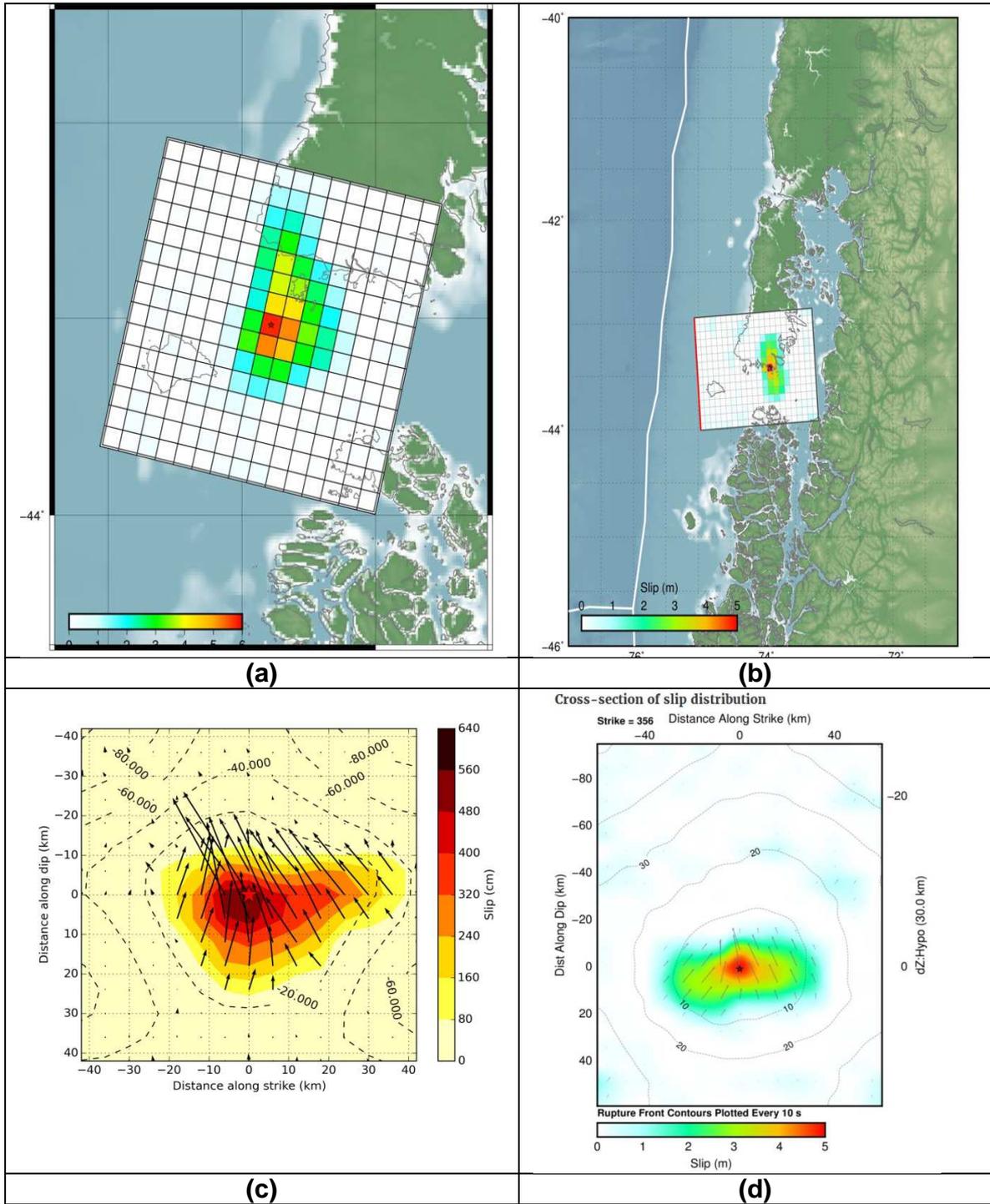


Figura 7. Modelos de ruptura preliminares según (a) CSN, (b) USGS. Distribución de deslizamiento en la fuente. Las flechas indican la dirección de la ruptura (c) CSN y (d) USGS.

### 3. Tsunami en la costa de Chile

#### 3.1 Registro por Estaciones de Nivel del mar

El terremoto de Chiloé generó un tsunami instrumental en las costas de la región de Los Lagos, que alcanzó a propagarse por el Golfo Corcovado y por la zona Oceánica de la región. La propagación del tsunami fue monitoreada en el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) mediante el software SAVTEC desde el momento del sismo.

Las ondas del tsunami fueron registradas desde la estación de Melinka por el sur hasta la de Bahía Mansa por el norte (Figuras 8 a la 11) mientras que en el resto de las estaciones de la red nacional no hubo registro del tsunami.

El primer arribo de onda fue registrado en la estación de Melinka aproximadamente a las 11:49 HL (14:49 UTC), 27 minutos después de ocurrido el sismo. Posteriormente, se registró el arribo en las estaciones de Castro a las 13:24 HL (16:24 UTC), Ancud a las 14:04 HL (17:04 UTC) y Bahía Mansa a las 15:39 HL (18:39 UTC), respectivamente.

En la tabla 2, se presenta las horas de arribo observadas en las estaciones de nivel del mar de la red nacional.

*Tabla N°2: Tiempos de arribo observados y pronosticados para el tsunami del 25 de diciembre de 2016*

<b>Estaciones</b>	<b>Hora de Arribo (Observado)</b>
Bahía Mansa	25-12-2016 15:39
Ancud	25-12-2016 14:04
Castro	25-12-2016 13:24
Melinka	25-12-2016 11:49

La tabla 3 muestra un resumen de las amplitudes máximas y períodos del tsunami registrados durante la activación del SNAM ante la amenaza de tsunami y sus horas respectivas. La amplitud máxima registrada fue de 0.44 m en la estación de Castro a las 15:26 hora local, mientras que los períodos fluctuaron entre 62 y 111 minutos asociados a las estaciones de Bahía Mansa y Melinka, respectivamente.

Tabla N<sup>o</sup>3. Amplitudes máximas registradas en las estaciones de nivel del mar a lo largo de Chile y sus respectivos períodos.

Localización estaciones	Amplitudes máximas observadas		Períodos (min)
	Tiempo (H.L.)	Amplitudes (m)	
Bahía Mansa	16:25	(+)0.16	62
	16:55	(-)0.13	
Ancud	15:43	(+)0.11	88
	16:22	(-)0.13	
Castro	15:26	(+)0.44	67
	16:09	(-)0.46	
Melinka	13:44	(+)0.12	111
	12:35	(-)0.16	

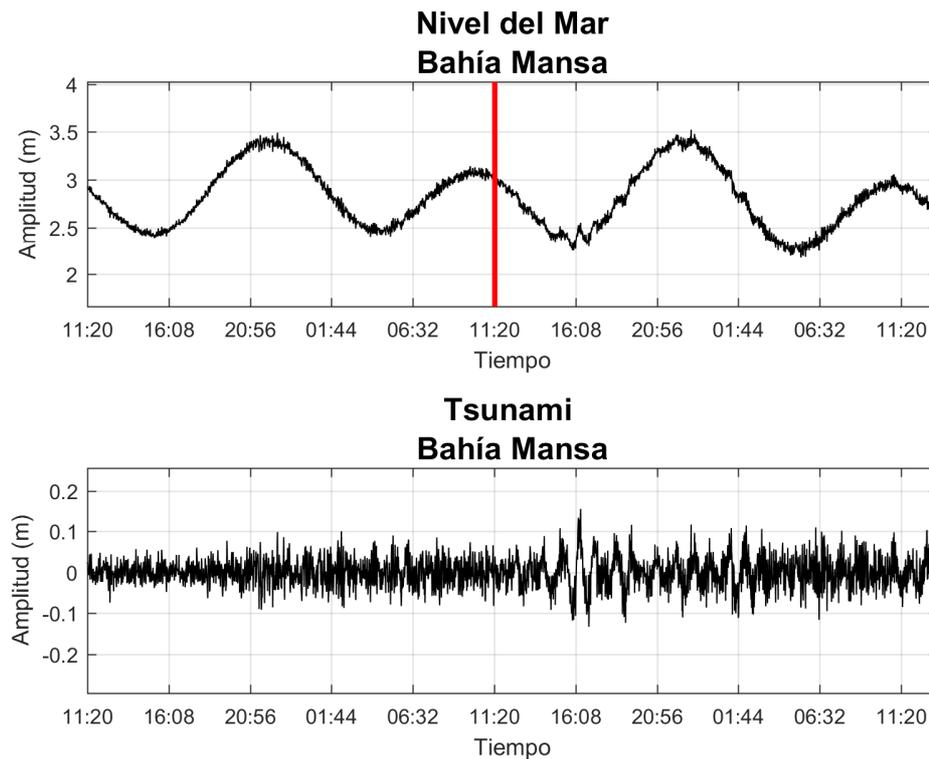


Figura 8. Registro del tsunami por la estación de nivel del mar de Bahía Mansa.

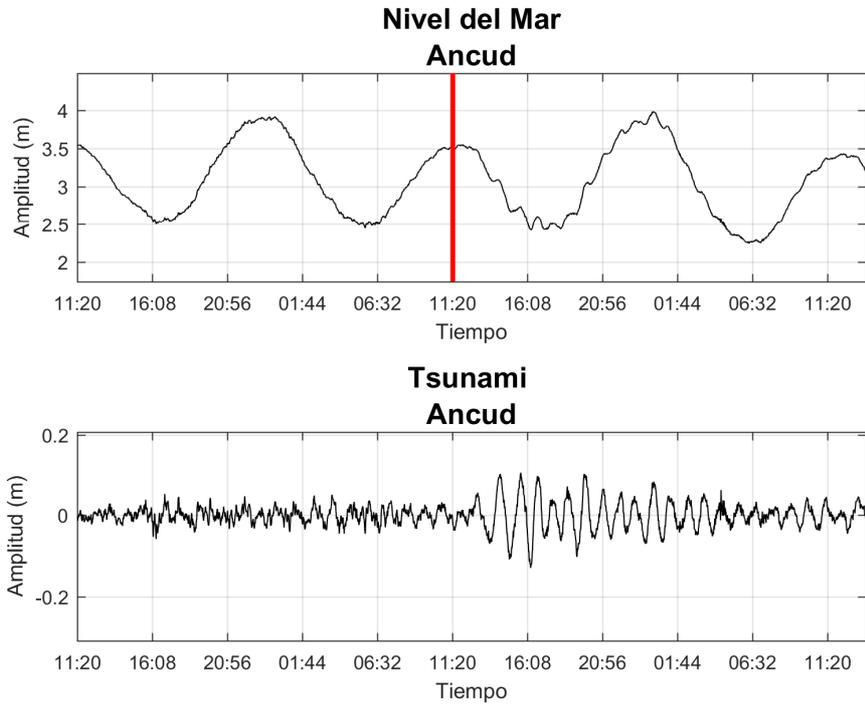


Figura 9. Registro del tsunami por la estación de nivel del mar de Ancud.

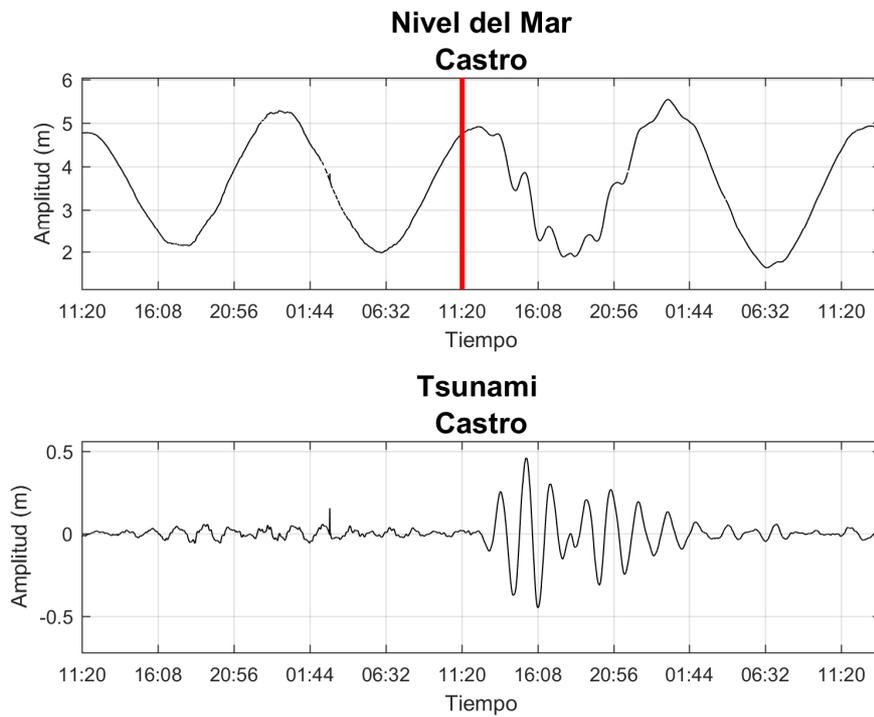


Figura 10. Registro del tsunami por la estación de nivel del mar de Castro.

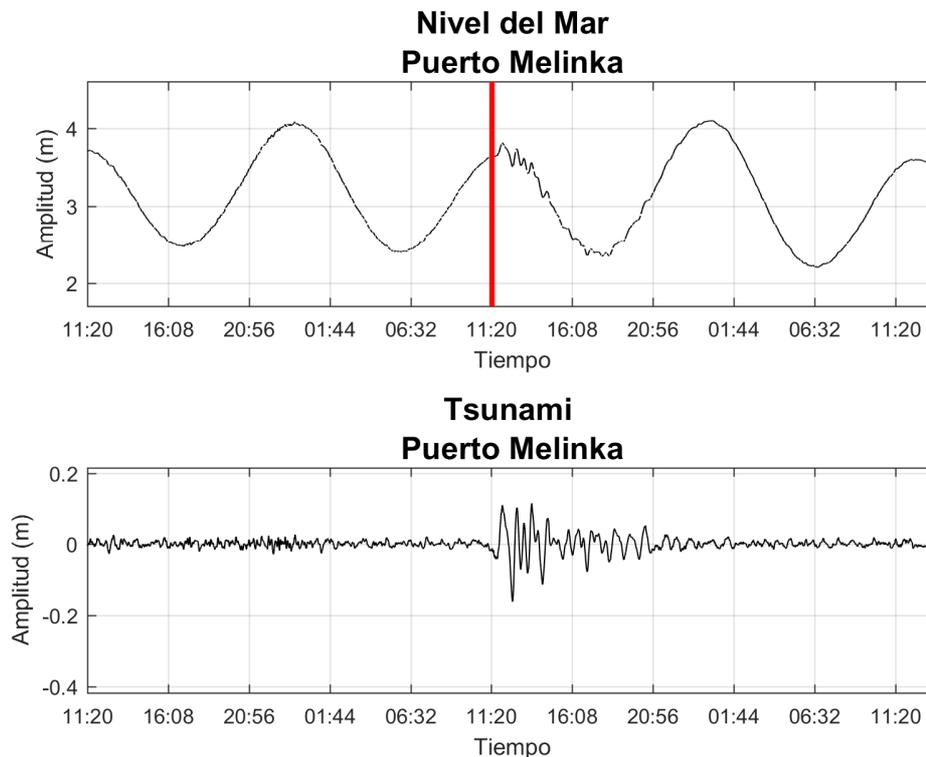


Figura 11. Registro del tsunami por la estación de nivel del mar de Melinka.

#### 4. Acciones y Boletines emitidos por el SNAM.

Desde el momento de la percepción del sismo, el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM) activó sus protocolos operacionales para evaluar la amenaza de tsunami para las costas de Chile y emitir de forma rápida y eficaz el boletín correspondiente. Para este evento se encontraba en operación el Sistema Integrado de Predicción y Alarma de Tsunami (SIPAT), mediante el cual se estimó que sólo las regiones del Bio bío, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén presentaban amenaza por tsunami, asociada a los estados de Alerta para Los Lagos y Precaución para el resto de ellas (Tabla 4 y Figura 12).

En consecuencia, para el evento del 25 de diciembre de 2016, el SNAM emitió 5 boletines, los cuales incluyen boletines de Amenaza de Tsunami para las costas de Chile, de tiempos de arribo de las ondas zonas afectadas, actualización de los estados de Amenaza y de cancelaciones parcial y total de ella.

Por su parte, basado en la evaluación realizada por el SNAM, la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública (ONEMI), estableció efectuar la evacuación de la zona de playa de las regiones en estado de Precaución y evacuación a zona segura de la región en Alerta de Tsunami.

Dentro de este contexto, ONEMI destacó la cultura cívica de las comunidades que realizaron las evacuaciones, centrados principalmente en la región de Los Lagos, donde se movilizaron cerca de 5.000 personas a las zonas de seguridad previamente establecidas. Cabe destacar que en cuanto al nivel de afectación, no se registraron desgracias personales, producto de este evento.

En la tabla N° 5, se presenta un resumen de los principales acciones y boletines emitidos por el SNAM y que dan cuenta del desarrollo y monitoreo del evento.

Tabla N°. Amenaza de Tsunami para Chile calculada mediante el SIPAT para el evento del 25 de diciembre de 2016.

<b>Propuesta</b>	<b>Nombre del Bloque</b>
Informativo	Arica y Parinacota
Informativo	Tarapacá
Informativo	Antofagasta Norte
Informativo	Antofagasta Sur
Informativo	Atacama Norte
Informativo	Atacama sur
Informativo	Coquimbo
Informativo	Valparaíso
Informativo	Libertado Bernardo O'Higgins
Informativo	Maule
Precaución	Bio Bio
Precaución	Araucanía
Precaución	Los Ríos
Precaución	Los Lagos Norte
Alerta	Los Lagos Sur
Precaución	Aysén
Informativo	Magallanes
Informativo	Territorio Antártico
Informativo	Ar. Juan Fernández
Informativo	Isla San Felix
Informativo	Isla de Pascua

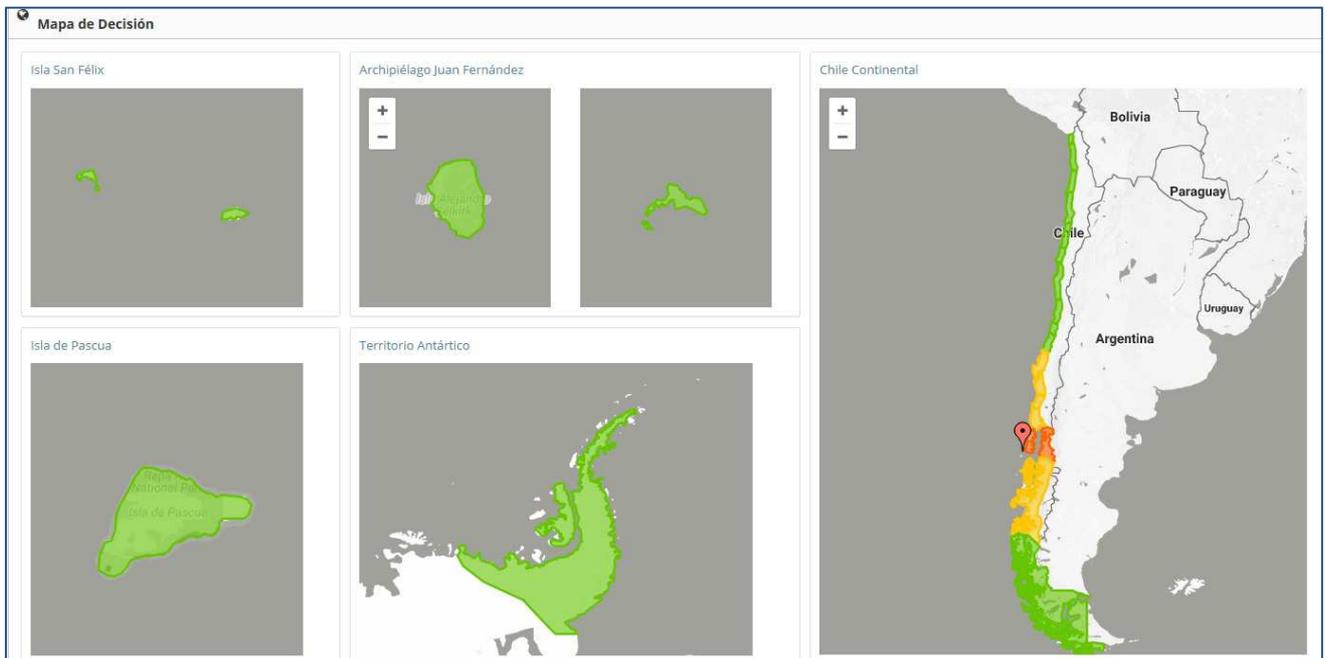


Figura 12. Mapa de Decisión de la Amenaza de Tsunami determinado por el SIPAT para el evento del 25 de diciembre de 2016.



Figura 13. Sistemas de recepción y difusión de información del SNAM durante el evento.



Figura 14. Sistemas de monitoreo del SNAM durante el evento.

Tabla N°5. Resumen de las acciones tomadas y boletines emitidos por el SNAM.

FECHA (dd/mm/aa)	HORA LOCAL	ACCIONES Y BOLETINES
25-12-2016	11:23	Se percibe sismo con una intensidad máxima registrada en Puerto Montt (VII Mercalli). Se reciben reportes de intensidades por red marítima DATAMAR II.
25-12-2016	11:26	Se recibe información sísmica preliminar del CSN, informando una magnitud 6.9 a 28 km al SW de Quellón.
25-12-2016	11:27	Se recibe información sísmica preliminar del NTWC (CISN Display) con una magnitud 7.5, y referencia geográfica 225 km al SSW de Puerto Montt.
25-12-2016	11:28	Se recibe información sísmica preliminar del PTWC (CISN Display) con una magnitud 7.6, y referencia geográfica 243 km al SSW de Puerto Montt.
25-12-2016	11:28	Se registra la activación del sistema DART 4G de Constitución.
25-12-2016	11:31	Se recibe boletín N°1 del PTWC "Amenaza de Tsunami" para un sismo de magnitud 7.7, y referencia geográfica al Sur de Chile.
25-12-2016	11:31	SNAM emite Boletín N°1 "Amenaza de Tsunami para las costas de Chile" por un sismo de magnitud 7.7, de referencia geográfica: 89 km al NW de Puerto Melinka.(Fuente: PTWC).
25-12-2016	11:32	Se recibe información sísmica revisada del NTWC (CISN Display) con una magnitud 7.7, y referencia geográfica 240 km al SSW de Puerto Montt.
25-12-2016	11:33	Activación de red de sirenas de la Autoridad Marítima
25-12-2016	11:35	ONEMI difunde Evacuación de la zona de playa de las regiones en estado de Precaución y evacuación a zona segura para la región en Alerta de Tsunami.
25-12-2016	11:38	Se recibe información sísmica final del CSN, informando una magnitud 7.6 a 67 km al NW de Melinka.
25-12-2016	11:43	Se recibe información sísmica desde el USGS/NEIC con información de sismo de magnitud 7.7, y referencia geográfica a 40 km al SW de Quellón.
25-12-2016	11:58	SNAM emite Boletín N°2 "Amenaza de Tsunami para las costas de Chile", informando los tiempos estimados de arribo de las ondas del tsunami para las zonas afectadas. Sismo de magnitud 7.7, de referencia geográfica: 89 km al NW de Puerto Melinka.(Fuente: PTWC).
25-12-2016	12:10	SNAM emite Boletín N°3 "Amenaza de Tsunami para las costas

		de Chile", actualizando información sobre los tiempos estimados de arribo de las ondas del tsunami para las zonas afectadas. Sismo de magnitud 7.7, de referencia geográfica: 89 km al NW de Puerto Melinka.(Fuente: PTWC).
25-12-2016	12:32	Se observa las ondas del tsunami en la estación de Melinka con amplitudes inferiores a los 20 cm.
25-12-2016	12:47	SNAM emite Boletín N°4 "Cancelación parcial de Amenaza de Tsunami" indicando que se cancela el estado de Precaución para la región de Biobío y el cambio de estado desde Alerta a Precaución para Los Lagos sur. Además informa sobre magnitud final del sismo de 7.6 informada por CSN.
25-12-2016	12:49	ONEMI difunde Cancelación de la Amenaza de Tsunami para la región del Biobío y término de evacuación de esa región y cambio de estado de Alerta a Precaución de Los Lagos. Mantiene evacuación de la zona de playa para dicha región.
25-12-2016	13:43	Se registra la activación de los sistemas DART de Constitución, Pichidangui, Caldera e Iquique sólo por el sismo, sin registro del tsunami.
25-12-2016	14:15	SNAM emite boletín N° 5 "Cancelación total de Amenaza de Tsunami" indicando que se cancelan totalmente los estados de Precaución para las regiones afectadas y se establece condición normal. Se mantiene monitoreo de estaciones de nivel del mar.
25-12-2016	14:17	ONEMI difunde Cancelación total de la Amenaza de Tsunami y disposición de retorno de la población evacuada.

## **5. Modelación numérica del Tsunami**

El evento de Chiloé fue modelado tomando como antecedente los parámetros sísmicos y de ruptura informados por el Centro Sismológico Nacional. Se utilizó el modelo COMCOT, una grilla de 30 segundos de resolución y se simuló 8 horas de tiempo.

Los resultados muestran como el tsunami generado arriba a los pocos minutos a Melinka y se continua propagando por el sector oceánico de Chiloé alcanzando Bahía Mansa alrededor de 5 horas después de ocurrido el sismo. Asimismo, se propaga por el Golfo Corcovado, alcanzando el Golfo de Ancud aproximadamente 2 horas desde ocurrido el evento (Figuras 15 y 16).

Las amplitudes del tsunami generado producto del sismo no superan los 50 cm., siendo la máxima amplitud registrada de 44 cm en la estación de Castro. Las Figuras 17 y 18 muestran una comparación del nivel del mar medido y simulado en las estaciones de Melinka y Castro, observándose que en términos de tiempos de arribo y formas de ondas existe un buen ajuste del modelo para Castro, pero en términos de amplitud el modelo subestima las amplitudes máximas las cuales no superan los 20 cm. Mientras que en Melinka, las tres primeras ondas se ajustan en forma y períodos, pero no así en amplitud, ya que el modelo muestra amplitudes mayores a las observadas. Estas diferencias podrían ser atribuibles a la resolución de la grilla utilizada para modelar, considerando los efectos en la propagación del tsunami en aguas interiores, específicamente para la estación de Castro.

Estos resultados preliminares dan una visión general de la propagación y comportamiento del tsunami generado por el sismo de magnitud 7.6 Mw, observándose un buen ajuste con la fuente sísmica estimada por el CSN.

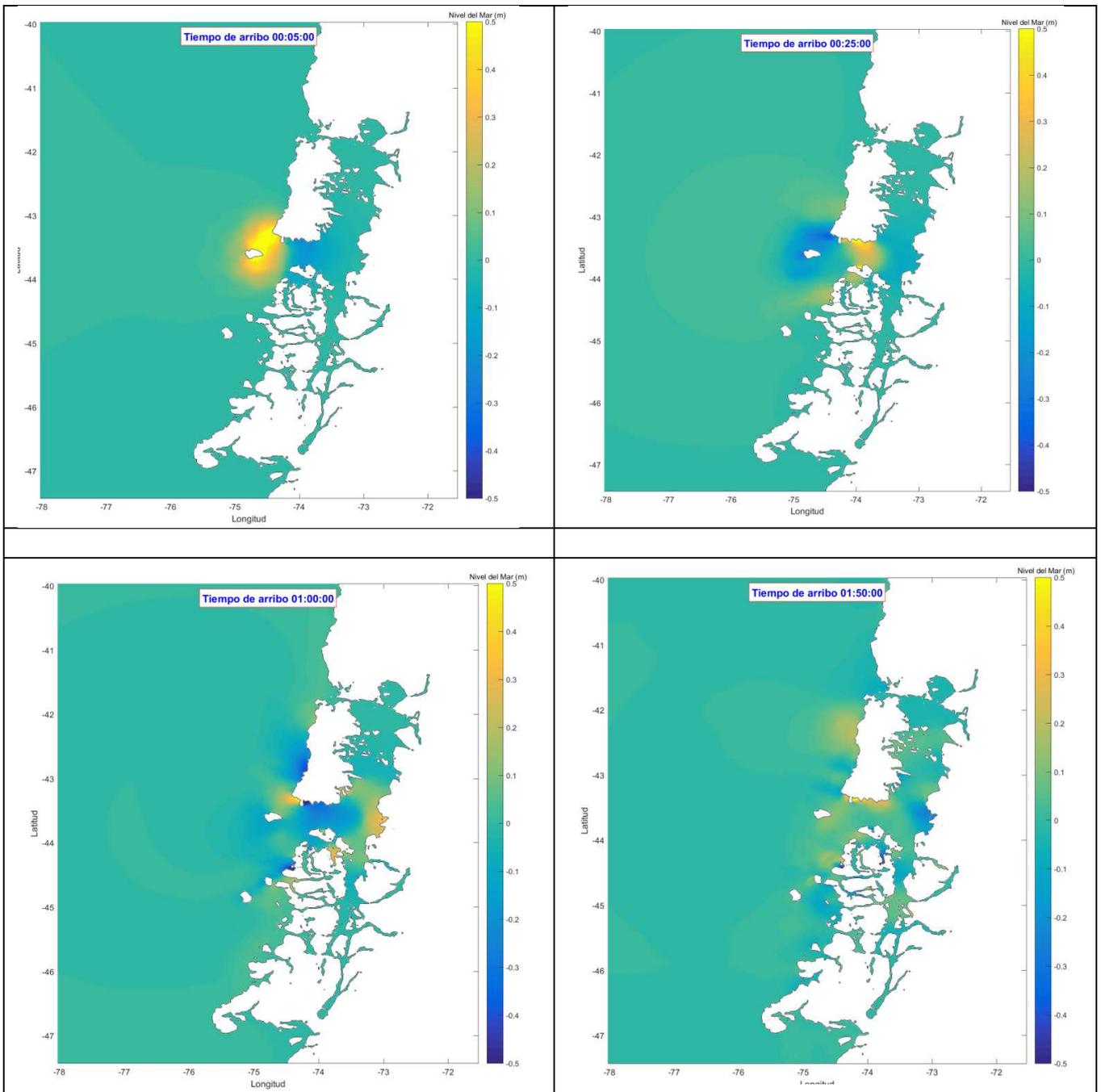


Figura 15. Resultados de la simulación de la propagación del tsunami del evento del 25 de diciembre de 2016. Se muestra la propagación del tsunami a los 5, 25, 60 y 110 minutos después de ocurrido el sismo.

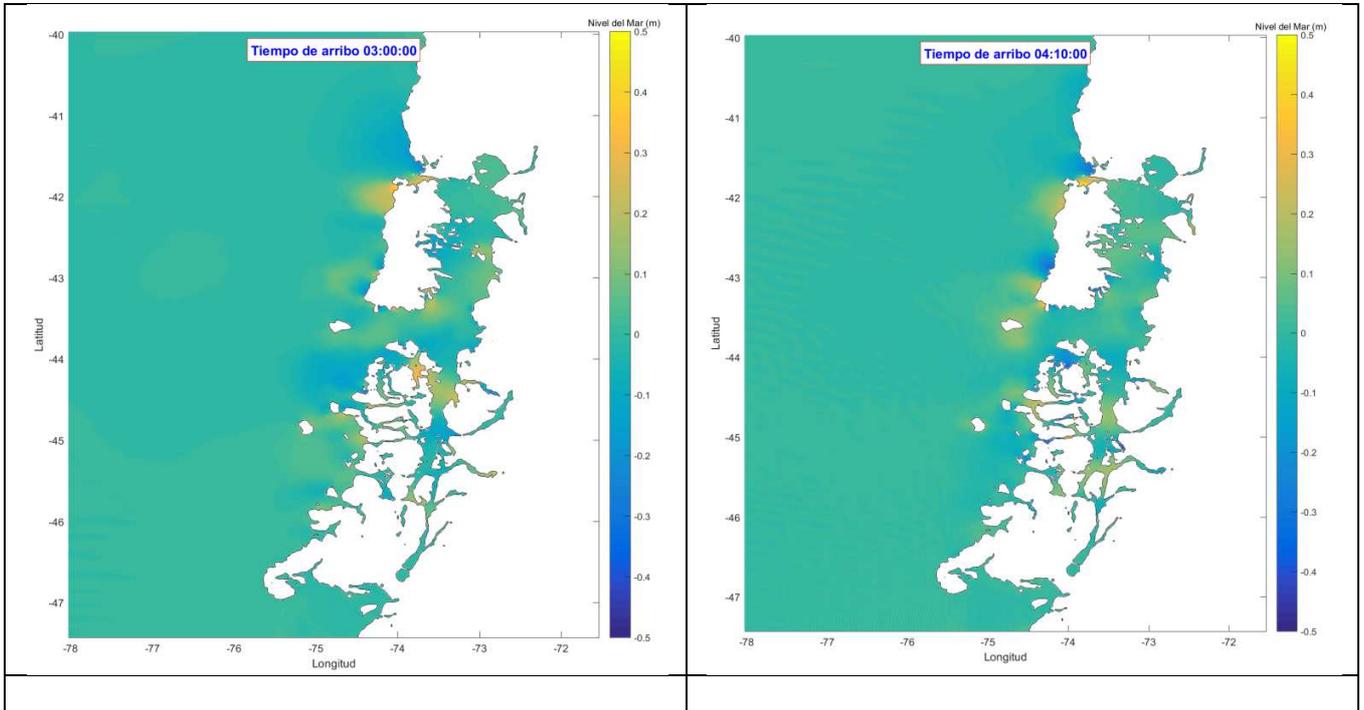


Figura 16. Resultados de la simulación de la propagación del tsunami del evento del 25 de diciembre de 2016. Se muestra la propagación del tsunami a los 180 y 250 minutos después de ocurrido el sismo.

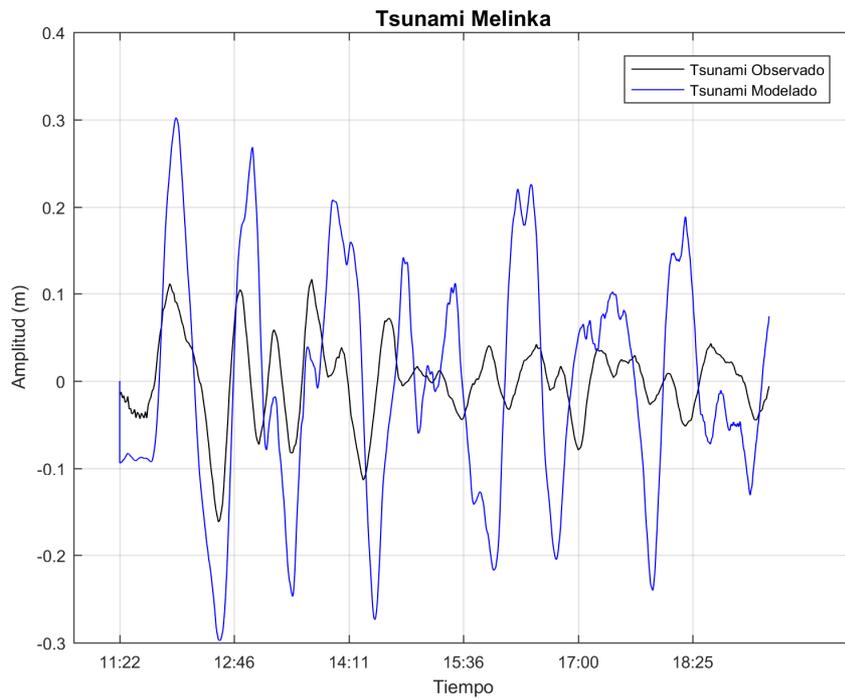


Figura 17. Comparación del nivel del mar medido y simulado en la estación de Melinka para el evento del 25 de diciembre de 2016.

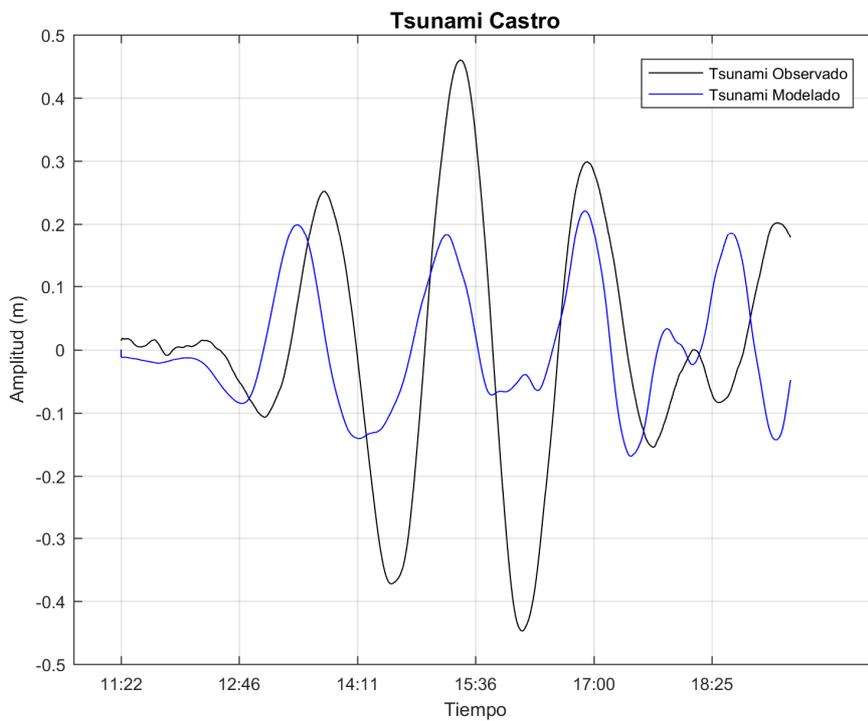


Figura 18. Comparación del nivel del mar medido y simulado en la estación de Castro para el evento del 25 de diciembre de 2016.

## **CONCLUSIONES**

El terremoto de Chiloé del 25 de diciembre de 2016 generó un tsunami instrumental en las costas de la región de Los Lagos, el que fue monitoreado por el Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM). Durante este evento se utilizó por primera vez el Sistema Integrado de Predicción y Alarma de Tsunami (SIPAT), entregando una rápida y eficiente evaluación de la amenaza por tsunami para las costas de Chile.

El SNAM emitió 5 boletines durante el evento y mantuvo una fluida comunicación con la ONEMI, quien a su vez destacó la cultura cívica de las comunidades que realizaron las evacuaciones que movilizaron cerca de 5.000 personas. Asimismo no se registraron desgracias personales producto del sismo.

La comparación del tsunami observado y modelado mostraron un buen ajuste en los tiempos de arribo y forma de onda, pero no así en amplitudes. Además, la propagación y comportamiento general del tsunami simulado con la fuente sísmica estimada por el CSN, se ajusta a lo registrado en las estaciones de nivel del mar.

## REFERENCIAS

Barrientos, S. (2016). Informe Técnico Terremoto Chiloé 25 Diciembre 2016. Centro Sismológico Nacional. 12 pp.

Cisternas, M.,Torrejón,F., Sawai Y., Machuca G., Lagos M.,Eipert A.,Youlton C.,Salgado I.,Kamataki T., Shishikura M.,Rajendran C.P.,Malik J.K.,Rizal Y y M.Husni (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature*, 437, 404-407.

Kanamori, H. and J.J. Cipar (1974). Focal process of the great Chilean earthquake of May 22, 1960. *Phys. Earth and Planet. Int.* 9, 128-136.

Rauld, R.(2011). Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la Falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33°s). Tesis para optar al grado de doctor en Ciencias mención Geología. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile. 445 pp.