

COMPORTAMIENTO DEL TSUNAMI DE COQUIMBO 2015 EN LA BAHÍA DE COLIUMO.

Roberto Maurelia¹, Dr. Rafael Aránguiz,² Mauricio Villagrán³

RESUMEN

Registros de tsunamis en Chile, como el ocurrido el 27 de febrero de 2010 y el 22 de mayo de 1960, muestran que han existido inundaciones significativas en la Bahía de Coliumo. Del mismo modo, eventos de campo lejano como el de Tohoku, Japón (2011) han afectado la bahía generando inundaciones de hasta 4m. El 16 de septiembre de 2015, el norte de Chile se vio afectado por un fuerte terremoto de magnitud 8.3°, generándose un tsunami el cual se propagó por todo el Océano Pacífico. Diversos instrumentos registraron la señal del tsunami al interior de la Bahía de Coliumo. A partir de estos registros es posible analizar el comportamiento de la bahía mediante comparaciones espectrales entre los datos reales y simulados.

Se modelaron tres fuentes de ruptura diferentes para el mismo evento y se propagaron utilizando batimetría de detalle durante 12 horas a través del modelo numérico NEOWAVE. Se validaron las fuentes utilizando mareógrafos en Coquimbo, Valparaíso, boya DART y Coliumo. A través de la validación, es posible indicar cuál de las tres fuentes representa mejor el comportamiento del tsunami. La alternativa seleccionada se utiliza para la comparación entre los datos simulados y reales registrados por los mareógrafos al interior de la bahía de Coliumo (ver Figura 1). Mediante una comparación en la variación del nivel del mar y un análisis espectral en cada uno de los mareógrafos, es posible dar respuesta al comportamiento que tiene la bahía frente a eventos tsunamigénicos. Los resultados de periodos resonantes en la bahía se comparan con los encontrados por otros autores, para dar claridad a si la excitación de periodos en la bahía corresponde a periodos locales o continentales.

Los resultados muestran que las simulaciones de eventos de campo lejano con propagación por la plataforma continental, difieren en cierta medida de los datos reales. Si bien, los gráficos de las amplitudes espectrales simulada y medida no son idénticos, existen algunos aspectos similares como el gran ancho de banda energético entre los 80 y 20 minutos. Por otro lado, se tienen coincidencia en los picos de 73.8 55 y 30 minutos. El espectro de la señal medida posee picos de energía predominantes en los periodos 75.8, 44 y 35 minutos los cuales coinciden con movimientos de oscilación a nivel continental. Por otro lado, se tiene un gran pico de energía a los 24.1 minutos, asociado a un periodo resonante exclusivamente de la bahía.

De este modo la bahía presenta amplificaciones de resonancia tanto a nivel local como continental, lo que daría respuesta a la sensibilidad que posee la bahía frente a eventos tsunamigénicos.

PALABRAS CLAVES: Tsunami; resonancia; espectros.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Sma Concepción, Chile. rmaurelia@ing.ucsc.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Sma Concepción, Chile. Investigador Asociado, Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN). rarangui@ucsc.cl

³ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Sma Concepción, Chile. mvillagran@ucsc.cl

ABSTRACT

Tsunami records in Chile, like the one that occurred in February 27, 2010 and May 22, 1960, show that significant floods have existed in Coliumo's Bay. In the same way, events for field tsunamis such as Tohoku, Japan (2011) have affected the bay generating floods up to 4m. In September 16, 2015; a strong earthquake whose magnitude reached 8.3 affected the north of Chile, being generated a tsunami, which propagated for the whole Pacific Ocean. Diverse instruments registered the sign of the tsunami inside of Coliumo's Bay. From these records it is possible to analyze the behavior of the bay throughout of spectral comparisons between the real and simulated data.

Three different sources of break were modeled for the same event and propagated using bathymetry of detail for 12 hours across the numerical model NEOWAVE. The sources were validated using a mareograph in Coquimbo, Valparaiso, boya DART and Coliumo. Across the validation, it is possible to indicate which of three sources represents in a better way the behavior of the tsunami. The selected alternative is used for the comparison between the simulated and real information registered by the mareographs inside Coliumo's bay (Figure sees 1). By means of a comparison in the variation of the level of the sea and a spectral analysis in each one of the mareographs, it is possible to give response to the behavior that has the bay opposite to tsunamigenic events. The results of resonant periods in the bay are compared with the ones found by other authors, to give clarity to if the excitation of periods in the bay corresponds to local or continental periods.

The results show that the simulations of events of distant field with spread of shore, turn out to be different from big distances, making slightly representative the beaks of density of energy to the inside of the bay. Nevertheless, the spectrum of the measured sign possesses predominant beaks of energy in the periods 75.8, 44 and 35 minutes that coincide with movements of oscillation to continental level. On the other hand, a great beak of energy is had to 24.3 minutes, partner to a resonant period exclusively of the bay. Thus the bay presents resonance amplifications so much to local as continental level, which would give response to the sensibility that possesses the bay opposite to tsunamigenic events.

KEYWORDS: Tsunami; resonance; spectrum.

1. INTRODUCCIÓN

La bahía de Coliumo, ubicada al norte de Concepción, región del Biobío, Chile (-36.54°S , -72.945°W), ha sido uno de los sectores más afectados por el pasado terremoto del Maule ($M_w=8.8$). Se registraron inundaciones de hasta 9.6m (Fritz et al., 2011). Por otro lado, registros históricos de eventos de campo lejano como el de Valdivia 1960 ($M_w=9.5$) han generado inundaciones de 3.5 a 7m en la bahía (Takahashi, 1961). Debido a la gran cantidad de damnificados, es de suma importancia estudiar y comprender el comportamiento de la bahía, para poder establecer medidas de mitigación adecuadas frente a eventos tsunamigénicos futuros.

El pasado terremoto de Coquimbo el 16 de septiembre de 2015 ($M_w=8.3$), tuvo su origen a 23.3km de profundidad (<http://www.sismologia.cl/>) con su epicentro localizado en -31.57°S , -71.67°W (Ye et al. 2015). La deformación del fondo marino generó un tsunami el cual afectó rápidamente a las zonas cercanas al evento registrándose runup de 4-6m en Coquimbo, con un máximo de 10.8m en Totoral (Aránguiz et al., 2016). El tsunami se propagó por todo el Océano Pacífico, siendo registrado por diversos instrumentos ubicados en distintas localidades como Coquimbo, Valparaíso, boyas DART. En la Bahía de Coliumo, el tsunami se registró instrumentalmente en el muelle de Coliumo (ver Figura 1)



Figura 1: Ubicación geográfica de la bahía de Coliumo. Los puntos rojos indican la ubicación de los mareógrafos al interior de la bahía llamados Estero, Coliumo y Dichato. (Fuente: Google earth).

Una de las características más destructivas y relevantes de los tsunamis, es la excitación de los modos naturales de oscilar que tienen las bahías, dando lugar al concepto de resonancia. Este fenómeno se produce por el acoplamiento de las frecuencias que posee el tsunami con las propias de la bahía, siendo el gran responsable de la amplificación de las ondas, atrapando la energía contenida por el tsunami debido a características topobatemétricas de la costa (Cortés, 2015).

Yamazaki and Cheung (2011) estudiaron la resonancia a nivel de plataforma continental del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010), a través de un análisis espectral de simulación numérica del evento, utilizando el modelo numérico NEOWAVE. El tiempo de cálculo cubre 15 horas utilizando dos mallas con una resolución de 1 minuto de arco (~ 4000 m) y 0.5 minutos de arco (~ 1000 m). Los resultados de la simulación son coherentes con los datos registrados por las boyas DART 32412, 51406, 43412 y 32411. De

esta manera se valida la fuente sísmica y propagación del tsunami, dando lugar a un análisis más detallado de la resonancia.

El análisis espectral de la superficie de elevación simulada define el movimiento de la superficie del mar a lo largo de la costa central de Chile como una función del periodo. De esta forma, se obtienen ocho modos de oscilar dominantes entre 35 y 129 minutos, seleccionados por sus nodos y antinodos bien definidos. El primer modo de resonancia tiene un gran ancho de banda de ondas estacionarias a lo largo de la costa, centrado a los **129 minutos**. En este periodo se aprecia una gran amplificación de energía en el Golfo de Arauco, la bahía de Concepción y Tolten. La resonancia a los **93 minutos** posee un gran parecido en la estructura del primer modo y muestra el modo fundamental en el Golfo de Arauco y en la bahía de Concepción. Los modos **79 y 73 minutos** muestran una gran amplificación de resonancia en la bahía de Concepción y Coliumo. La gran escala del sistema de ondas estacionarias está en transición con variaciones de fase gradual a los **64 minutos** de periodo. Las oscilaciones de plataforma disminuyen a lo largo de la costa de Tolten, concentrando su energía en dirección norte. A medida que el periodo disminuye de **54 a 46 minutos** las ondas estacionarias de orilla migran hacia el norte y ondas de borde de orden superior con antinodos fuera de la costa se desarrollan sobre la plataforma continental más ancha hacia el sur. El sistema de gran escala desaparece a los **35 minutos** de periodo, mientras que las ondas estacionarias de borde se extienden hacia la plataforma de Valparaíso.

Bai et al. (2015) simularon el evento de Tohoku (2011) para examinar las ondas estacionarias a lo largo del Océano Pacífico y proporcionar una perspectiva por toda la cuenca de las oscilaciones persistentes registradas por boyas DART después del tsunami. Para ello utilizó el modelo numérico NEOWAVE con un tiempo de cálculo de 72 horas para caracterizar la propagación hacia América del Sur, reflexión hacia Asia y resonancia en toda la cuenca. Utilizaron una malla de 2 minutos de arco (~3600 m) incorporando las grandes plataformas de hielo para considerar la reflexión de las ondas a lo largo de la costa de la antártica, que a su vez influyen en las ondas estacionarias de la cuenca. Los registros simulados de la variación del nivel del mar presentan una buena aproximación con los registros captados por las 29 boyas DART ubicadas por toda la cuenca del Océano Pacífico. Para revelar los patrones de oscilación se aplicó una transformada de Fourier de la elevación de superficie bidimensional. Se encontraron modos de oscilar entre 15 y 80 minutos los cuales se extienden a través del Océano Pacífico con elaboradas redes de ondas estacionarias y parcialmente estacionarias. La energía capturada se evidencia en los márgenes continentales y a lo largo de las cadenas de islas en la dirección general de la propagación del tsunami. Cabe señalar que la mayoría de los modos de oscilación deducidos del tsunami, tienen una fuerte direccionalidad entre Japón y Chile. El estudio mostró que a partir del modo **32 minutos**, se comienza a percibir elaborados patrones de ondas estacionarias y semi-estacionarias, las cuales se conectan desde América del Sur por medio de islas y montes submarinos hasta la Polinesia Francesa. La teleconexión va en aumento a medida que aumenta el periodo, registrándose amplitudes de energía considerables en América del Sur para los periodos de **44, 53, 64 y 80 minutos**. Este último, corresponde al periodo que une toda la cuenca del pacífico mediante ondas estacionarias, registrando amplificados niveles de energía en las costas de Chile.

Cisternas (2014), realizó un estudio de resonancia y modos naturales de oscilar en la bahía de Coliumo utilizando el método de funciones ortogonales empíricas (EOF) propuesto por Tolkova & Power (2011). El método encuentra patrones espaciales de variabilidad, su variación en el tiempo y da una medida de importancia a cada patrón (Björnsson & Venegas, 1997). Además, simuló los eventos de 1960 y 2010 con el fin de obtener series de tiempo de la elevación del nivel del mar como espectros de energía en la plataforma continental y al interior de la bahía, para así contrastar los resultados con los periodos naturales de oscilar de la bahía. El método de las Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) consiste en aislar la bahía de la plataforma continental y generar perturbaciones dentro de ésta. Cisternas genera seis perturbaciones para excitar los modos normales de la bahía, donde cada perturbación tiene la forma de la campana Gaussiana. Se consideran un conjunto de tres condiciones iniciales diferentes en la bahía ($\sigma = 0.5\text{km}$, $\sigma = 1\text{km}$ y $\sigma = 1.5\text{km}$) donde " σ " corresponde al diámetro de la perturbación inicial. Las seis perturbaciones en la bahía para cada uno de los diámetros de la perturbación inicial, se realizaron mediante el modelo numérico no lineal de aguas someras TUNAMI-N, considerando 4 mallas anidadas de 27 (~830m), 9 (~270m), 3 (~90m) y 1 (~30m) segundos de arco de resolución y se modelaron durante 8 horas.

Por otro lado, las simulaciones de los eventos se realizan mediante el modelo numérico NEOWAVE (Non-hydrostatic Evolution of Ocean Wave), utilizando 4 mallas anidadas de 120 (~3600 m), 30 (~900m), 6 (~180m) y 1(~30m) segundos de arco de resolución. Una vez modelado los eventos, se realizó un análisis espectral, de tal forma que se puedan contrastar estos resultados con los periodos naturales obtenidos en la bahía.

Los resultados de los modos naturales de oscilar, utilizando el método de EOF, indican que el primer y segundo modo representan un 70% de la varianza para la perturbación $\sigma=1.5$ km, la cual resultó ser la más representativa de las tres. De esta forma, el primer modo corresponde a un periodo de 30 min con un movimiento longitudinal a la bahía, mientras que el segundo modo corresponde a 10 min con un movimiento transversal a ésta. De esta forma, una posible excitación del primer modo fundamental puede generar una amplificación en la energía de las ondas, ya que este representa un 63% de la varianza total. El análisis espectral de la variación de la superficie libre para el tsunami de 1960, asocia la máxima energía del espectro con el periodo del primer modo fundamental. De manera similar, el evento del 2010, presenta una gran amplificación de energía en la banda de periodos entre 20 y 35 min. La tabla 1 muestra los picos energéticos más representativos de los espectros para los eventos de Maule, Valdivia.

Tabla 1: Periodos de picos energéticos para los dos eventos en la bahía de Coliumo.

Evento	Periodos pico en minutos				
Maule (2010)	28	32	44	-	88
Valdivia (1960)	30	-	-	55	-

Aravena (2016), realizó un análisis de marea y espectros de fondo para las bahías de Coliumo, Concepción y San Vicente, con el fin de identificar periodos resonantes asociados a la batimetría en cada una de las bahías. Para el desarrollo de su trabajo utilizó el método de análisis espectral propuesto por Rabinovich, (1997) en el cual se busca comparar la distribución de energía de oscilaciones sin forzantes externos, denominados oscilaciones de fondo con la distribución energética de oscilaciones con forzantes externos o de tsunami.

En un primer escenario, Aravena utilizó un registro de marea durante un año en la bahía de Concepción para estudiar la sensibilidad del espectro de fondo promedio a diferentes ventanas de registro de datos. Concluyendo que con registros de hasta 2 semanas se tienen errores inferiores al 5% en comparación con una ventana de 1 año de medición. Lo que conlleva a que es posible realizar un análisis espectral hasta con registros de dos semanas. Dicho lo anterior, se utilizaron registros de marea de 4 meses en la bahía de Coliumo para caracterizar el espectro de fondo promedio y contrastarlo con el espectro de energía del tsunami del 2015 registrado por el mareógrafo ubicado en la bahía (Coliumo, ver Figura 1). De esta forma, los posibles periodos resonantes de la bahía serán aquellos que compartan picos de energía tanto en el espectro de fondo como en el espectro de tsunami, permitiendo cuantificar que parte importante de la respuesta se debe a resonancia local. Los resultados de los picos energéticos para la bahía en ambas situaciones se presentan en la Tabla 2, resaltando con un estilo ennegrecido los candidatos a ser periodos resonantes de la bahía.

Tabla 2: Periodos resonantes para la bahía de Coliumo.

Evento	Periodos en minutos												
Fondo	120.5	73.1	62.1	49.9	45.5	37.9	31.5	28.4	-	24.1	22.3	20.9	19.7
Coquimbo	113.8	73.1	55.4	-	44.5	37.9	33.6	29.2	25.3	23.8	-	-	17.5

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el comportamiento de la bahía de Coliumo frente al evento de Coquimbo 2015. Para ello se implementa la simulación del evento con 3 fuentes tsunamigénicas, lo que conlleva a tener registros del nivel de marea y espectros de energía diferentes para cada una. Para la selección de la fuente a utilizar, se comparan los datos de series de tiempo y espectros entre las 3 simulaciones, validando la que mejor se ajusta a los registros obtenidos por los mareógrafos que captaron la señal. Por otro lado, los resultados de la simulación seleccionada se superponen con la metodología propuesta por Rabinovich (1997), la cual compara espectros de fondo con espectros de tsunami para determinar si los periodos corresponden a efectos propios de la bahía o de la fuente. El capítulo 2 presenta una breve reseña de los materiales y métodos necesarios para el desarrollo del presente estudio. El capítulo 3 muestra los resultados obtenidos, mientras que finalmente en el capítulo 4 se presenta la discusión y posterior conclusión en el capítulo 5.

2. MATERIALES Y MÉTODO

En la primera etapa, se simuló el tsunami de Coquimbo (2015) con el modelo no hidrostático NEOWAVE (Yamazaki et al. 2009, 2011) de diferencias finitas. Basado en las ecuaciones no lineales de aguas someras, con un término de velocidad vertical para considerar las ondas levemente dispersivas y un esquema de conservación de momentum para describir las discontinuidades del flujo como bores y saltos hidráulicos (Yamazaki, 2009). El modelo Resuelve las ecuaciones en dos direcciones de mallas anidadas en coordenadas esféricas o cartesianas (Aránguiz, 2013). Se utiliza un coeficiente de Manning $n=0.025$ característico del fondo oceánico. Los datos de topo batimetría se obtuvieron a partir de la base de datos GEBGO los cuales poseen una resolución de $30''$, cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceánico de la Armada de Chile (SHOA) con una resolución de $6''$ y batimetrías de detalle, mientras que la topografía de detalle se construyó a partir de datos LIDAR de 2.5 m de resolución. Como dato de entrada, se utilizaron 4 mallas anidadas de 120 (~3700m), 30 (~925m), 6 (~185m) y 1 (~30.8m) segundos de arco de resolución, las cuales son representadas por las Figuras 2 y 3.

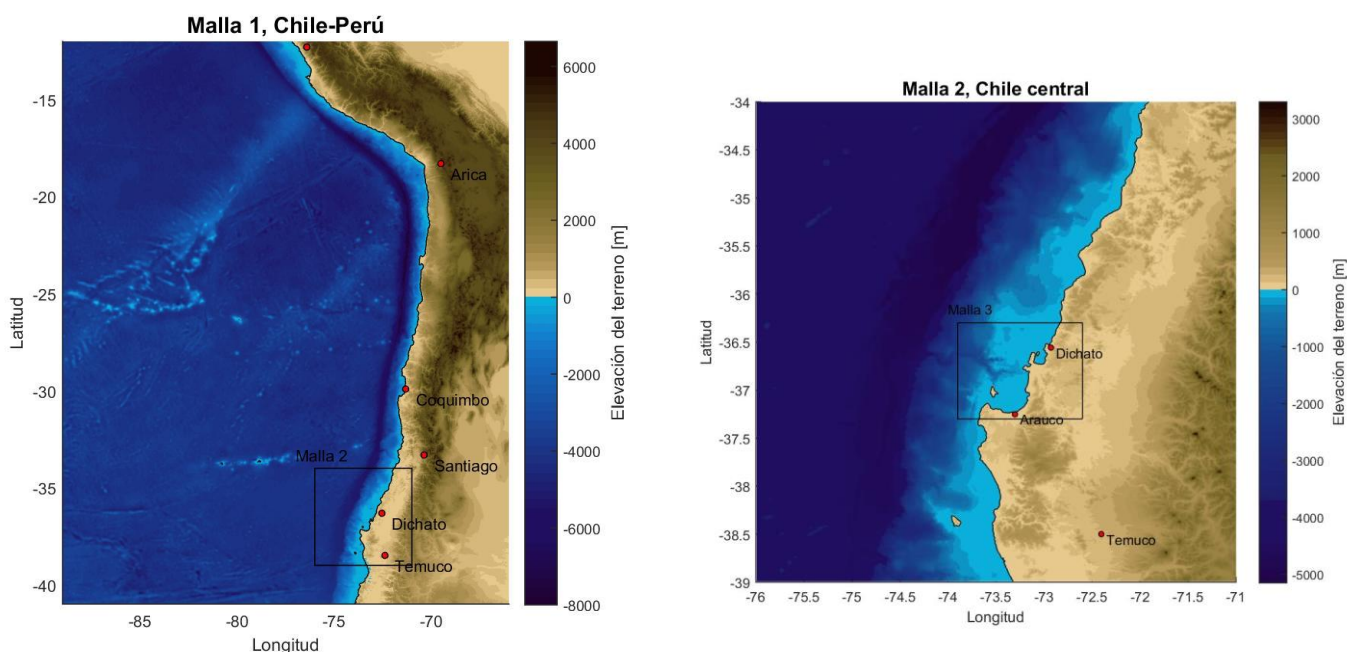


Figura 2: Mallas anidadas con resolución de $120''$ para la malla 1 y $30''$ para la malla 2.

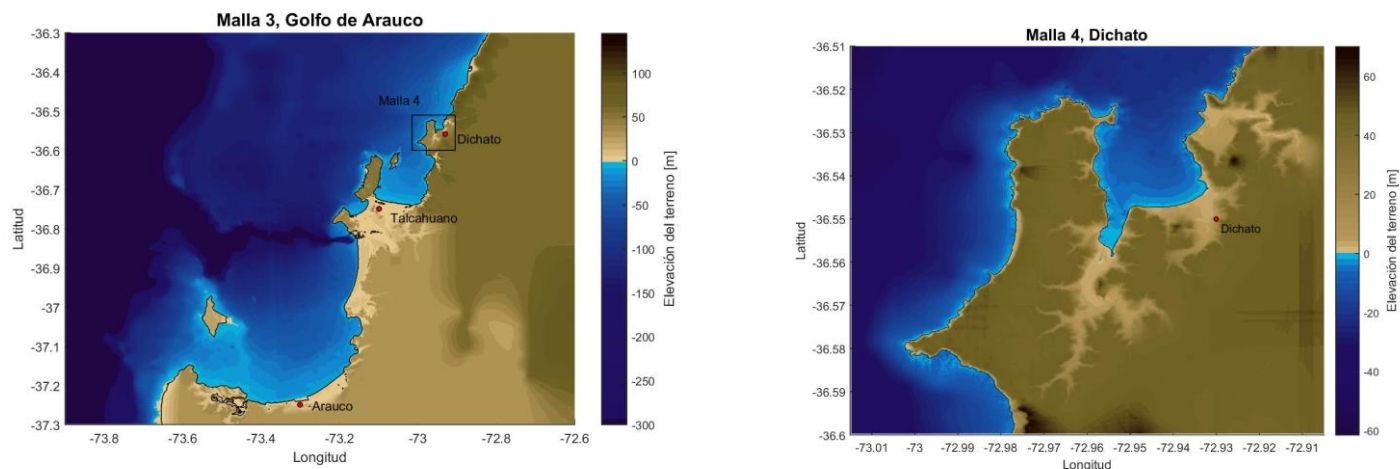


Figura 3: Mallas anidadas con resolución de 6'' para la malla 3 y 1'' para la malla 4.

Se utiliza un modelo de ruptura dinámico publicado por Li et al. (2016) y dos variantes más proporcionadas por el autor (ver Figura 4). Los modelos se obtuvieron a través de la distribución de deslizamientos del evento, mediante el modelado iterativo de ondas tele-sísmicas, validando los resultados con las observaciones del tsunami de boyas DART y mareógrafos en Hawaii, los cuales son sensibles a la longitud de la ruptura. El primer modelo consideró 72 subfallas de 22x15km con un strike de 5°, rake variado entre 70° y 140° y un dip variado de 5, 9, 13, 17, 21 y 25°, mientras que el segundo modelo considera una cantidad de 81 subfallas de 22x15km con un strike constante de 5°, rake variado entre 50° y 140° y un dip variado de 5, 13, 17, 21 y 25°. Finalmente, el tercer modelo lo componen 90 subfallas de la misma dimensión y con los mismos ángulos strike, rake y dip. Los parámetros de cada subfalla permiten el cálculo de la deformación del fondo marino a través del modelo de falla plana de Okada (1985), la cual entrega una solución analítica para la deformación inicial del fondo marino asumiéndola igual a la superficie libre del mar (Aránguiz & Belmonte, 2012). En la Figura 5, 6 y 7 (A), se aprecia la deformación inicial para los 3 modelos de ruptura.

Se utilizaron tres puntos de interés en la bahía de Coliumo para captar la señal del tsunami simulado, los cuales poseen la misma ubicación de los instrumentos utilizados por Aravena (2016) que miden la variación del nivel del mar en la bahía. La Figura 1 muestra la ubicación de cada uno de los puntos de medición, los cuales obedecen a un planteamiento nodal, de tal forma de identificar distintos modos de oscilar y evitar que algún punto quede justo en un nodo. Los cálculos de la simulación cubren 12 horas desde el inicio del sismo, con respuestas de salida de 1 minuto.

Para realizar el análisis espectral de las señales del tsunami se utiliza una transformada de Fourier (FFT), la cual calcula la energía presente en la señal y la distribuye en los distintos componentes. Es sumamente importante restar la marea astronómica de la señal, ya que ésta posee magnitudes de energía mayores, por lo que no se resuelve de buena manera la energía generada por el tsunami. Dicho lo anterior, se utiliza la herramienta de MATLAB, T_TIDE de 35 constituyentes armónicas que representan diferentes procesos astronómicos, los cuales permiten reconstruir la marea astronómica y sustraerla de la serie de tiempo medida en el mareógrafo.

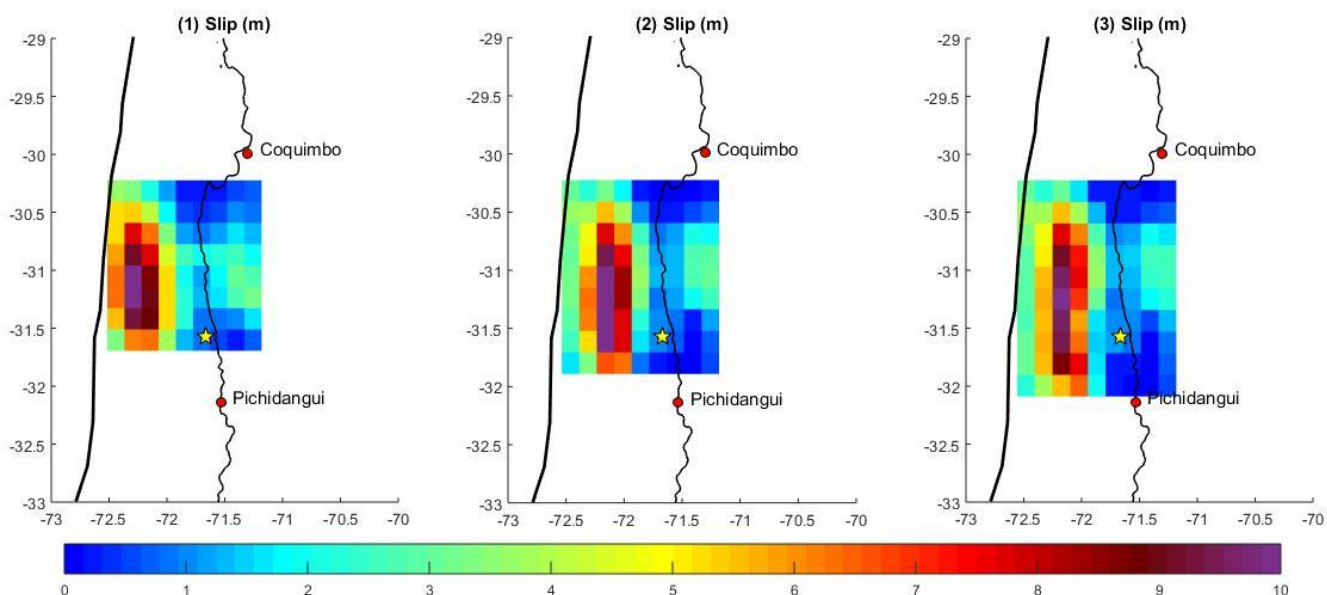


Figura 4: Distribución de deslizamientos (slip) utilizados en el estudio. (1) representa el modelo de 72 subfallas, (2) representa el modelo de 81 subfallas y (3) representa el modelo de 90 subfallas. La estrella amarilla representa el epicentro del evento.

3. RESULTADOS

Como se indicó en el capítulo 2, la deformación inicial del evento Coquimbo (2015), se obtuvo a partir de tres modelos de ruptura dinámica. Las figuras 5, 6 y 7 representan las condiciones iniciales (A) para cada evento. En el centro (B) de la figura, se ubican las series de tiempo asociadas a cada mareógrafo utilizado para la validación del modelo. En estos se aprecian las variaciones del nivel del mar simulado y medido para los mareógrafos de Valparaíso, Coquimbo, boya DART y Coliumo. Finalmente, en (C) se representan las amplitudes espectrales, calculados con series de 12 horas de duración.

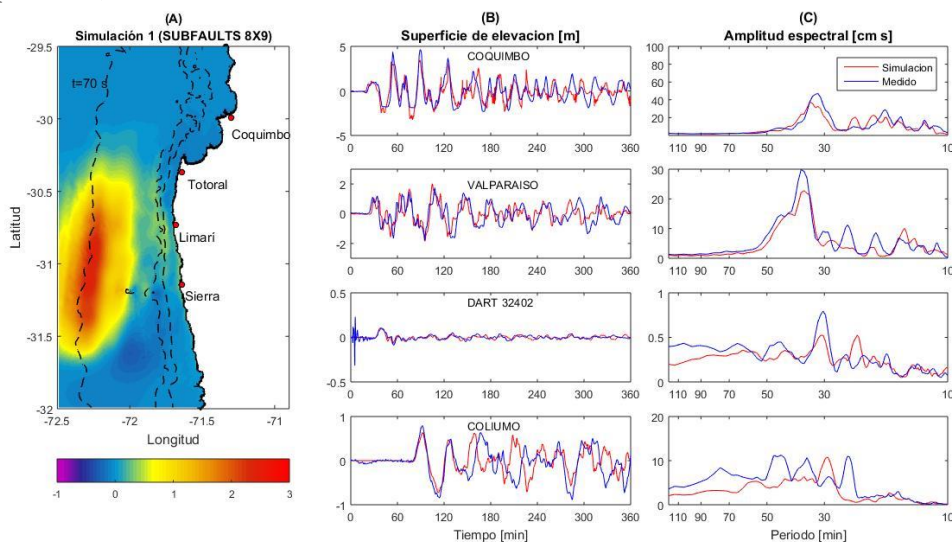


Figura 5: Condición inicial, series de tiempo y espectros de energía para el modelo de ruptura 1. Las líneas segmentadas en (A) representan 500, 1000 y 4000 m de profundidad.

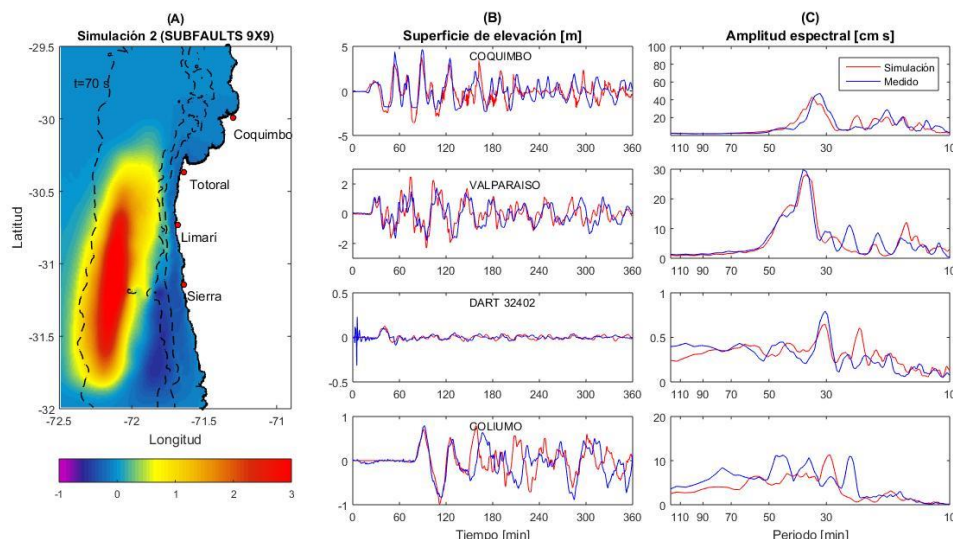


Figura 6: Condición inicial, series de tiempo y espectros de energía para el modelo de ruptura 2. Las líneas segmentadas en (A) representan 500, 1000 y 4000 m de profundidad.

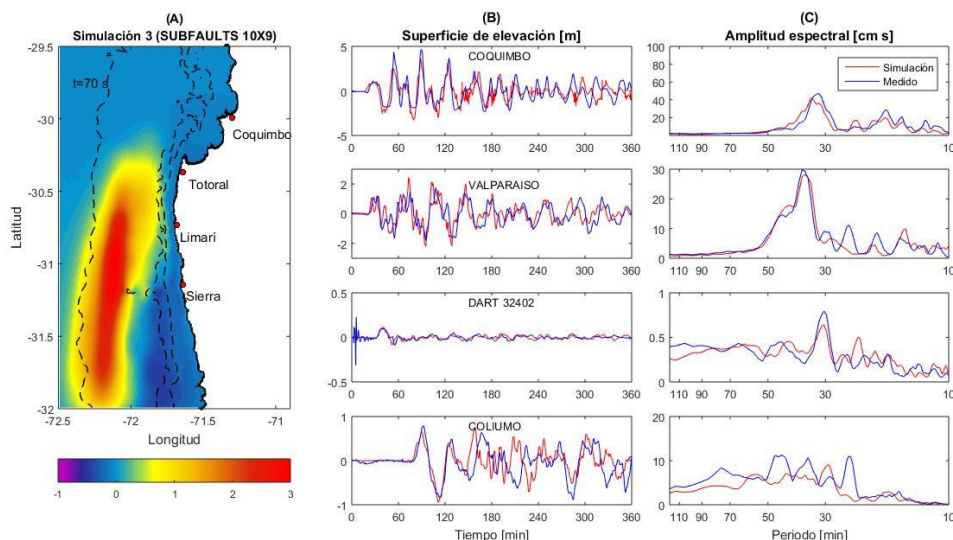


Figura 7: Condición inicial, series de tiempo y espectros de energía para el modelo de ruptura 3. Las líneas segmentadas en (A) representan 500, 1000 y 4000 m de profundidad.

Las series de tiempo y espectros en cada uno de los modelos de ruptura analizados muestran un comportamiento similar en la forma de los registros y los periodos obtenidos. Sin embargo, En la Figura 5 (B), la simulación para el mareógrafo de Coquimbo muestra un adelanto en la llegada de la primera onda de 3 minutos, generando un desfase por toda la serie de tiempo. Asimismo, en el mareógrafo de Valparaíso la llegada de la primera onda se registra 2,67 minutos después de los datos medidos. Por otro lado, el mareógrafo de Coliumo presenta el mismo tiempo de llegada tanto para la simulación como para los datos medidos, sin embargo, se observa una diferencia de 30 cm en la altura de la primera onda. En la Figura 6 (B), la simulación para el mareógrafo de Coquimbo presenta un adelanto de 5 minutos con respecto a los datos medidos. En contraste con el modelo 1, el mareógrafo de Valparaíso no presenta desfase en el tiempo de llegada, ni diferencias de amplitud para las primeras dos ondas. El mareógrafo de Coliumo presenta tiempos de llegada iguales, con una leve diferencia en la amplitud de la primera onda de 12 cm. La Figura 7 (B), muestra un desfase en el tiempo de llegada de 6 minutos para Coquimbo. Valparaíso presenta un desfase de 3 minutos, mientras que Coliumo el tiempo de llegada es el mismo para el evento simulado y el medido, pero se aprecia

una diferencia de 17 cm en la amplitud de la primera onda. Cabe señalar que el comportamiento de la boya DART analizada fue muy similar entre el evento simulado y el medido para los tres modelos de falla. Por lo que no fue criterio para la selección de la fuente óptima a utilizar.

La selección del modelo se centró básicamente en las series de tiempo, ya que los cálculos de los espectros de energía dependen de éstos. De esta forma, el modelo 2 representado por la Figura 6, es el que presenta un mayor ajuste entre los datos simulados y los medidos. Dicho lo anterior en la Figura 8 y 9 se presentan instantáneas cada 30 segundos para la generación y propagación del evento e instantáneas cada 50 segundos para el arribo de la onda a la costa. Se registra la amplitud máxima o condición inicial poco después del minuto desde el tiempo inicial, con una deformación máxima de 3 metros.

En la Figura 9 se aprecia la llegada de la primera onda del tsunami cerca de los 450 segundos o 7.5 minutos desde el inicio del evento, tal como lo registra Aránguiz et al. (2016).

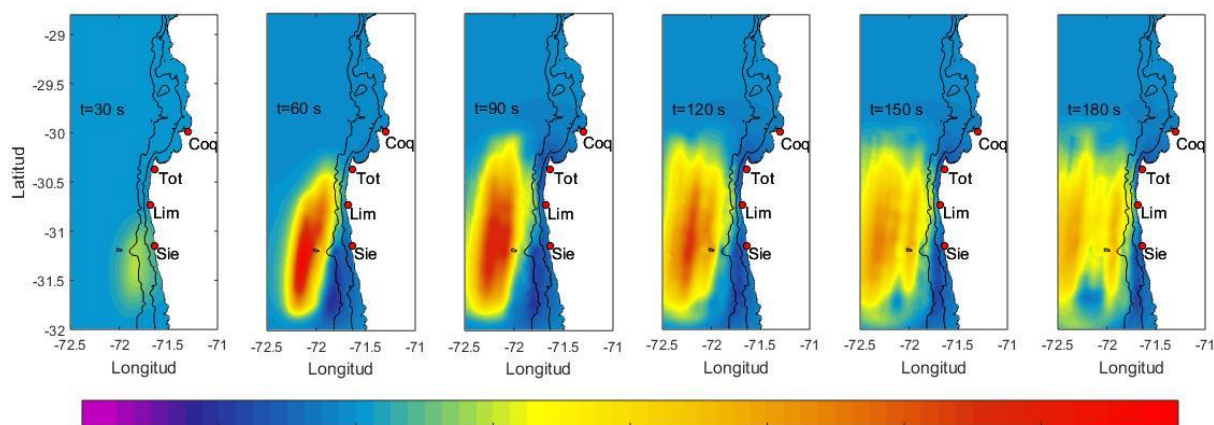


Figura 8: Generación y propagación del tsunami Coquimbo (2015). Las instantáneas van de 30 a 180 segundos desde el inicio de evento.

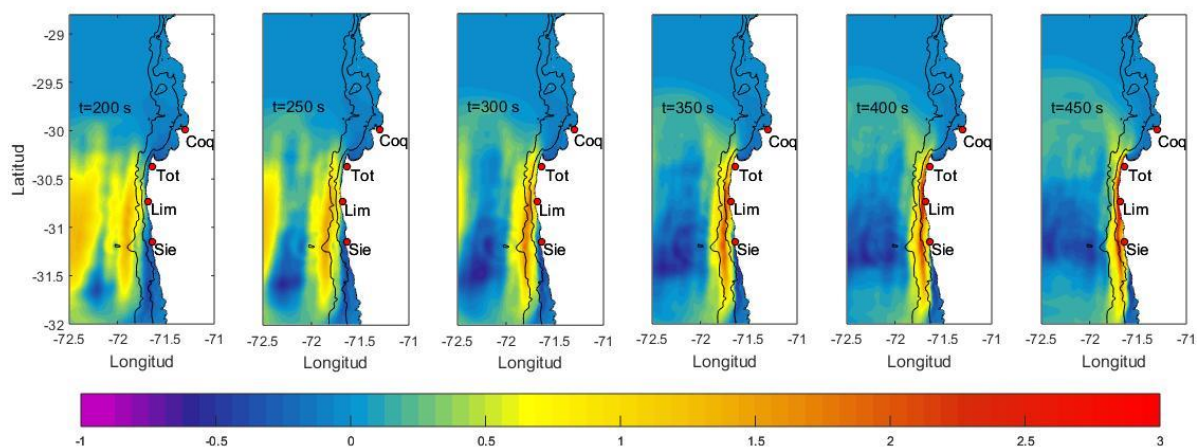


Figura 9: Arribo a la costa del tsunami Coquimbo (2015). Las instantáneas van de 200 a 450 segundos desde el inicio de evento.

Luego de haber determinado la fuente más representativa del evento, se determinaron los periodos resonantes de cada punto de medición mediante el método propuesto por Rabinovich (1997). La comparación entre el espectro de tsunami, el de fondo y el simulado, nos dará luces del comportamiento de la bahía frente a forzantes externos. Sin embargo, esta comparación es válida solamente para el mareógrafo de Coliumo, ya que los ubicados en Dichato y Estero no presentan registros del evento, por lo que su comparación será entre el espectro de fondo y el evento simulado.

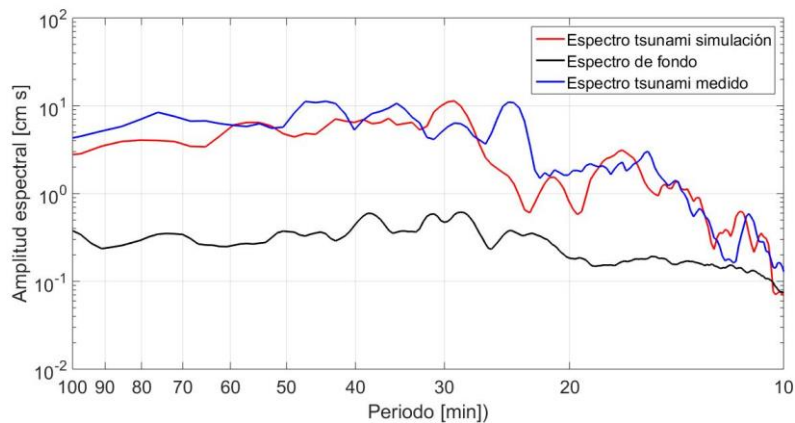
4. DISCUSIÓN

En el capítulo anterior se presentaron los resultados correspondientes a la validación del modelo y la superposición del método de Rabinovich (1997) con los espectros simulados. Las señales simuladas presentan un buen ajuste en los tiempos de arribo y alturas de elevación del nivel del mar para los mareógrafos de Coquimbo, Valparaíso y boya DART. Por otro lado, en Coliumo, la señal simulada presenta un buen ajuste en el tiempo de arribo y alturas de elevación del mar para las primeras tres ondas. En base a los espectros, no se aprecia un comportamiento idéntico al interior de la bahía, pero si se pueden apreciar algunos aspectos similares, como los periodos de 73.8, 55 y 30 minutos. Por otro lado, los espectros de los puntos seleccionados para validar el modelo (ver Figura 6), la simulación presenta un buen ajuste con el espectro de energía de la señal medida por los mareógrafos en Valparaíso, Coquimbo y boya DART.

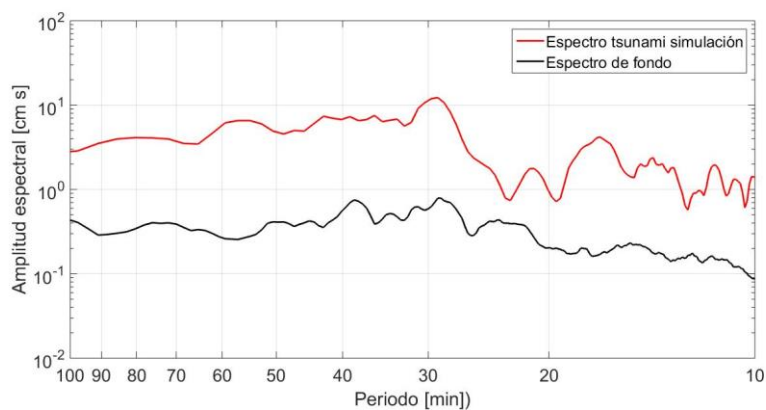
En la Figura 10 se aprecia que el espectro de energía del tsunami simulado es muy similar en los tres mareógrafos, lo que indicaría a priori que el comportamiento real del tsunami sería similar en los mareógrafos que no poseen la medición. En el mareógrafo Coliumo, se puede apreciar una gran banda de energía entre los 80 y 20 minutos para la simulación, con un pico de densidad energética máxima en el periodo de 30 minutos, correspondiente al modo fundamental de la bahía (Cisternas et al. 2014). El registro del tsunami medido presenta un comportamiento similar en la banda entre los 80 y 20 minutos, con la diferencia que los picos energéticos son marcados y diversos en toda la banda. Sin embargo, la amplitud espectral máxima se concentra en los periodos de 24 y 44 minutos. Los mareógrafos de Dichato y Estero presentan un comportamiento similar en cuanto a la gran banda energética entre los periodos de 80 y 20 minutos. De este modo el comportamiento del tsunami está influenciado de gran manera por la plataforma continental.

A medida que el tsunami simulado se propaga por la plataforma continental, va arrastrando errores, los cuales influyen en las señales captadas en los puntos de interés. Este error se puede atribuir al modelo de ruptura, ya que éste sólo es un modelo y no representa el comportamiento exacto de la ruptura del evento. Por otro lado, se puede asociar el error al modelo numérico utilizado, el cual no estaría resolviendo de buena manera el comportamiento de la señal al interior de la Bahía de Coliumo. Finalmente, una última fuente de error se puede asociar a una baja resolución en las mallas utilizadas.

COLIUMO



DICHATO



ESTERO

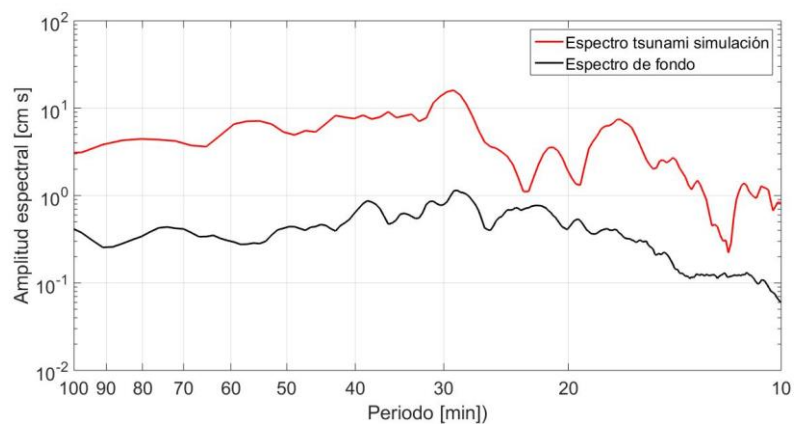


Figura 10: Espectro de fondo (negro), simulado (rojo) para los mareógrafos Coliumo, Dichato y Estero. Medido (azul) para el mareógrafo de Coliumo.

La Figura 11, muestra la elevación del nivel del mar para el mareógrafo de Coliumo durante 12 horas. Es evidente que la señal que transmite la simulación (rojo) difiere de la señal medida (azul), presentándose inclusive elevaciones del nivel del mar, donde realmente se produce una disminución de este. En el minuto 540 (9 hrs), se presenta una gran amplificación en los datos medidos, mientras que la simulación presenta una altura de onda mucho menor, de hecho las amplitudes disminuyen con respecto al tiempo.

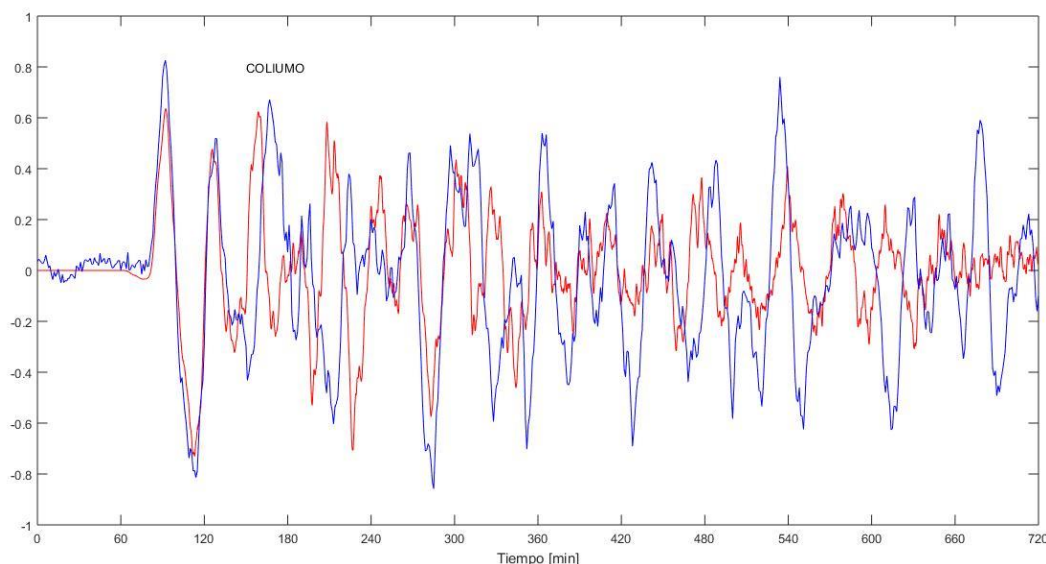


Figura 11: Elevación de la superficie del mar en (m), para 12 horas de análisis. Medido (azul), simulado (rojo)

El espectro de energía medido en Coliumo presenta un comportamiento bastante singular, puesto que al igual que la simulación presenta un alto nivel energético en la banda de los 80 y 20 minutos, el cual decae posteriormente. A diferencia de la simulación, este presenta diversos picos de densidad de energía máxima en toda la banda, haciendo evidente la multi-excitación de periodos resonantes dentro de la bahía.

En la Figura 12, se aprecian los periodos encontrados por cada autor mencionado en el capítulo 1 del presente estudio. El primer pico energético del registro se ubica a los **73.8 minutos**, el cual se asocia con el periodo encontrado por Yamazaki and Cheung (2015) de 73.1 min, representando un modo de oscilar de la plataforma continental. Este pico de densidad de energía, también puede ser asociado al encontrado por Bai (2015) correspondiente a 80 min. Este periodo representa un modo de oscilar por toda la cuenca del pacifico y es el que mostró mayores amplitudes energéticas en las costas de Chile y América del Sur.

El segundo pico de densidad de energía predominante en el mareógrafo de Coliumo toma el valor de **56.9 minutos**. Espectros de varios eventos muestran picos energéticos para el mismo periodo. Yamazaki and Cheung encontraron un periodo de 55.4 min que afectaba a toda la costa central de Chile. Por otro lado, Bai (2015) presenta un modo de oscilación de 53 minutos en la cuenca del Pacifico, donde las ondas estacionarias y semi-estacionarias se conectan de América del Sur a través de redes de islas y montes submarinos. Cortes (2015), realizó un análisis de dominio extendido en el norte de Chile y encontró un periodo de 55.5 minutos, lo que daría indicio de un modo de oscilar que se extiende por todo Chile continental.

El pico de densidad energía máximo del espectro corresponde al periodo de **44.6 minutos**. Yamazaki and Cheung (2015) presentan un modo de oscilación de 46 min, mientras que Bai (2015) encuentra un periodo de 44 min.

El cuarto pico representado en el espectro medido, corresponde al periodo **29.05 minutos**. Este periodo se puede asociar al modo de oscilación de 32 minutos encontrado por Bai et al. (2015) el cual es el comienzo de la inter-conexión de América del Sur con las islas y montes submarinos de la cuenca del Pacífico. Por otro lado, se tiene el resultado encontrado por Cisternas (2014), donde el periodo de 30 minutos corresponde al modo fundamental en el cual oscila la bahía, asociando a este modo el de mayor peligro para la bahía. Una tercera comparación se aprecia en el espectro de fondo de la bahía, ya que para este periodo se aprecia su máxima amplitud energética, lo que puede indicar una validez del periodo fundamental encontrado por Cisternas (2014).

Finalmente se visualiza la segunda amplitud máxima en el espectro medido, correspondiente a **24.1 minutos**. Este periodo no lo describe ningún autor mencionado, por lo que su amplificación estaría relacionada netamente a un periodo de resonancia local.

Esto nos daría luces a que la bahía presenta un comportamiento sensible frente a fuerzas externas, viéndose afectada tanto para excitaciones a nivel continental como local. Esto puede responder a los grandes niveles de inundación sufridos en la bahía para eventos como el de Valdivia (1960) y el Maule (2010), incluso eventos de campo lejano como el de Tohoku (2011).

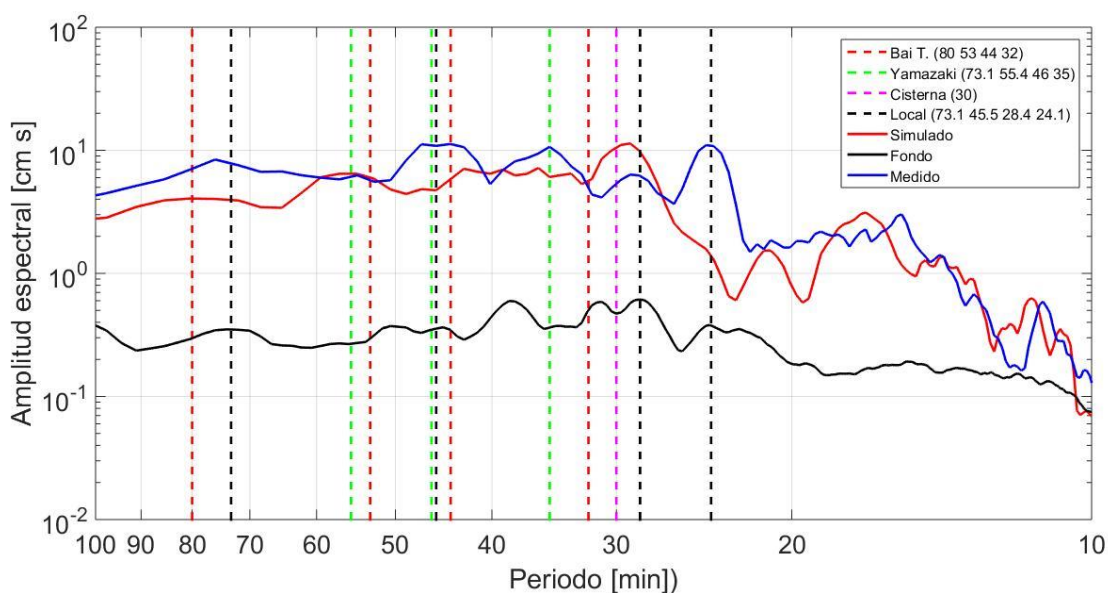


Figura 12: Espectro de fondo (negro), simulado (rojo) y medido (azul) para el mareógrafo de Coliumo. Las líneas segmentadas indican los periodos encontrados por cada autor.

5. CONCLUSIÓN

Se calculó el evento de Coquimbo (2015) con tres fuentes tsunamigénicas diferentes, las cuales obedecen a distinta cantidad y dimensiones de subfallas. Se concluyó que el modelo más representativo del evento está asociado al modelo 2, el cual presenta menor diferencia en tiempos de llegada y amplitud para los diversos mareógrafos analizados.

Al analizar las amplitudes espectrales proporcionados por el método de Rabinovich (1997) con los medidos y simulados, se visualizan algunos aspectos similares. Ambos casos presentan una gran concentración de energía en la banda de los 80-20 minutos. Por otro lado, existen algunos picos de energía presentes en ambas situaciones, como lo es el pico a los 73.8, 55 y 30 minutos.

La señal simulada presenta una mayor excitación del modo fundamental de la bahía (30 minutos) a diferencia de la señal medida, la cual presenta una multi-excitación de periodos. Esto puede estar relacionado a que el modelo no está captando el comportamiento real dentro de la bahía, el cual puede estar asociado a un tema de baja resolución.

La comparación de los picos energéticos con los periodos encontrados por cada uno de los autores considerados en este estudio, nos indica que la bahía se ve afectada por la resonancia tanto a nivel continental como local, generando un acoplamiento de modos de oscilar condicionado por la plataforma continental. De esta forma se presenta un estado de vulnerabilidad frente a eventos de tsunamigénicos, condicionada por su configuración topo-batimétrica.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONICYT por el apoyo entregado a través del proyecto FONDECYT 11140424

7. REFERENCIAS

- Aránguiz, R. (2013). *Generación del Tsunami 1960 en el Sur de Chile*. XXI Congreso Chileno de Hidráulica, Concepción, Chile. 23 al 25 de Octubre, 2013.
- Aránguiz, R., & Belmonte, A. (2012). *Efecto en la Bahía de Concepción de un Tsunami Generado en el Norte de Chile*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica. 9 al 12 Septiembre, 2012.
- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P., Cienfuegos, R., Yagi, Y., . . . Del Rio, I. &. (2016). *The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives*. Pure and Applied Geophysics.
- Aravena, E. (2016). *Aanálisis de marea y espectros de fondo en las bahías de Coliumo, Concepción y San vicente*. Universidad Católica de la Sma. Concepción.
- Bai, Y., Yamazaki, Y., & Cheung, K. (2015). *Interconnection of multi-scale standing waves across the Pacific Basin from the 2011 Tohoku Tsunami*. Ocean Modeling, 92(2015)183–197.
- Björnsson, H., & Venegas, S. A. (1997). *A Manual for EOF and SVD Analyses of Climatic Data*. Department of Atmospheric and Oceanic Sciences and Centre for Climate and Global Change Research McGill University.
- Cortés, P. (2015). *Estudio de resonancia de ondas largas en la plataforma continental chilena*. Universidad Ferderico Santa María.
- Fritz, H. M., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., . . . & Synolakis, C. E. (2011). *Field Survey on the 27 February 2010*. Pure and Applied Geophysics, 2011, N° 168, p. 1989-2010.
- Li, L., Lay, T., Cheung, K. ., & Ye, L. (2016). *Joint modeling of teleseismic and tsunami wave observations to constrain the 16 September 2015 Illapel, Chile, Mw 8.3 earthquake rupture process*. Geophysical Research Letters. AGUPUBLICATIONS.
- Rabinovich, A. B. (1997). *Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects*. . Journal of Geophysical Research: Oceans, 102(C6), 12663-12663-12676.
- Takahashi, R. (1961). *A Summary Report on the Chilean Tsunami of May 1960. Report on the Chilean Tsunami of May 24, 1960, as observed along the Coast of Japan*. Committe for the Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960.
- Tolkova, E., & Power, W. (2011). *Obtaining natural oscillatory modes of bays and harbors via Empirical Orthogonal Function analysis of tsunami wave fields*. Ocean Dynamics 61:731-751.
- Yamazaki, Y., & and Cheung, K. F. (2011). *Shelf Resonance and Impact of Near-field Tsunami generated by the 2010 Chile Earthquake*. Geophysical Research Letters, 38(12), L12605.
- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2009). *Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and runup*. Int. J. Numer. Methods fLUIDS, 61(5), 473-397.

Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2011). *Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation and runup*. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 67(12), 2081-2107.

Ye, L., Lay, T., Kanamori, H., & Koper, K. (2015). *Rapidly Estimated Seismic Source Parameters for the 16 September 2015 Illapel, Chile Mw 8.3 Earthquake*. *Pure Appl. Geophys.*