

## **RAZONES DE LA GRAN INUNDACIÓN DE DICHATO PARA EL TSUNAMI DE JAPÓN DEL AÑO 2011.**

*Pedro Henriquez<sup>1</sup> y Dr. Rafael Aránguiz,<sup>2</sup>*

### **RESUMEN:**

El tsunami de Japón del año 2011 llegó a las costas de Chile donde se observaron diversos valores de altura de inundación. El caso más relevante lo presentó Dichato ubicado al interior de la Bahía de Coliumo, en donde se midieron hasta 4 m de altura de inundación, mientras que en Talcahuano, dentro de la Bahía de Concepción, sólo se midieron inundaciones de hasta 2 m. El presente estudio analiza las razones de las grandes amplitudes de las ondas del tsunami al interior de la Bahía de Coliumo. Para ello se realizó un análisis espectral bidimensional de una simulación numérica transpacífica del tsunami, a fin de determinar la presencia de ondas estacionarias y los periodos en los que éstas se producen. Además, se determinaron para el área de estudio los periodos resonantes y los patrones espaciales de amplificación asociados a dichos periodos, mediante la combinación de análisis espectral en mareógrafos y análisis modal. La zona en observación la comprende en detalle la Bahía de Coliumo y en general la Plataforma continental que incluye además las bahías de Concepción y San Vicente. El análisis espectral bidimensional indica que el tsunami generó ondas estacionarias con modos y periodos bien definidos en la Bahía de Coliumo. Al contrastar estos periodos con los modos naturales de la bahía reportados tanto en trabajos previos como el presente estudio, se puede afirmar que los periodos del tsunami concuerdan aproximadamente con los periodos naturales de la bahía, generando resonancia. Así, es posible concluir que la gran inundación observada en Dichato, se debió principalmente a amplificaciones de las ondas del tsunami producto de la resonancia, lo anterior combinado con una geomorfología especialmente vulnerable a estos eventos, conllevan a que la bahía no pueda acomodar el gran volumen de agua entrante aumentando así la altura de inundación.

**PALABRAS CLAVES:** Dichato; Tsunami; Resonancia.

### **ABSTRACT:**

The 2011 Japan tsunami reached the coast of Chile where various flood height values were observed. The most relevant case was presented by Dichato located inside the Bay of Coliumo, where up to 4 m of flood height was measured, while in Talcahuano, within the Bay of Concepción, only floods of up to 2 m were measured. The present study analyzes the reasons for the large amplitudes of the tsunami waves inside the Bay of Coliumo. For this purpose, a two-dimensional spectral analysis of a transpacific numerical simulation of the tsunami was carried out, in order to determine the presence of standing waves and the periods in which they occur. In addition, the resonant periods and spatial amplification patterns associated with these periods were determined for the study area by combining spectral analysis in tide gauges and modal analysis. The area under observation is comprehended in detail by the Bay of Coliumo and in general the Continental Shelf which also includes the Bays of Concepción and San Vicente. Two-dimensional spectral analysis indicates that the tsunami generated standing waves with well-defined modes and periods in Coliumo Bay. By contrasting these periods with the natural modes of the bay reported in previous works as well as the present study, it can be stated that the tsunami periods correspond approximately to the natural periods of the bay, generating resonance. Thus, it is possible to conclude that the great flood observed in Dichato was mainly due to amplifications of the waves of the tsunami caused by the resonance, combined with a geomorphology especially vulnerable to these events, which means that the bay can not accommodate the great Volume of incoming water thus increasing the height of flood.

**KEYWORDS:** Dichato; Tsunami; Resonance.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [phenriquez@ing.ucsc.cl](mailto:phenriquez@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE. Investigador Asociado, Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN). [raranguiz@ucsc.cl](mailto:raranguiz@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La localidad de Dichato está emplazada en una planicie ubicada en la zona sureste de la Bahía de Coliumo (Ver Figura 1), la cual a su vez se sitúa 37 km al norte de la ciudad de Concepción, Región del Bío-Bío, Chile. Este pueblo fue afectado por el tsunami del 27 de Febrero de 2010 registrando alturas de inundación superiores a los 7m (Fritz et al, 2011). Adicionalmente, el evento tsunamigénico de campo lejano proveniente de Japón el año 2011, también impactó severamente a Dichato alcanzando hasta 4 m de altura de inundación (Aránguiz & Shibayama, 2013), lo anterior toma mayor relevancia si se comparan sus efectos con los ocurridos en Talcahuano en donde sólo se registraron inundaciones de hasta 2m, aun cuando ambas bahías están orientadas hacia el norte y también se emplazan al sur de la zona de generación del tsunami de 2011. Por lo tanto, debido a lo anterior, es de suma importancia analizar y conocer el comportamiento de la Bahía de Coliumo frente a este tipo de eventos, para así ordenar los territorios en función de las potenciales amenazas, desarrollar planes de respuesta efectivos, proponer medidas de mitigación y manejar potenciales emergencias.



**Figura 1:** Ubicación geográfica de Dichato (Google Earth).

Los mareógrafos de Talcahuano, Valparaíso, Lebu y Coquimbo registraron oscilaciones persistentes en la señal del tsunami de Japón del año 2011, y además muestran que la onda más destructiva se manifiesta generalmente después de la llegada del primer frente del tsunami. Lo anterior, da luces sobre la presencia del fenómeno de resonancia en las costas chilenas, donde la energía contenida en el tsunami se ve atrapada, existiendo una amplificación de la altura de las ondas debido a las características topo-batimétricas de la costa (Cortés, 2015).

Múltiples autores han realizado estudios con respecto a la resonancia y modos de oscilar en las bahías de Chile. Yamazaki & Cheung (2011) estudiaron la resonancia a nivel de plataforma continental del tsunami generado por el terremoto del Maule (2010, Mw 8.8) mediante un análisis espectral de la simulación numérica del evento. Para la simulación utilizaron el modelo numérico NEOWAVE con un tiempo de cálculo de 15h y mallas de hasta 0.5' de resolución (~1000 m). Los resultados obtenidos son consistentes tanto con los datos registrados por las boyas DART y mareógrafos como con los testimonios recabados a residentes de las zonas más afectadas. En dicho trabajo, se identifican estructuras modales conformadas por ondas estacionarias y cuasi estacionarias seleccionadas por sus nodos y antinodos bien definidos, estas estructuras se extienden aproximadamente 800 km, desde Valdivia hasta Valparaíso. En el artículo, se afirma que existe migración de la energía de resonancia de sur a norte a medida que el período de oscilación disminuye con el ancho de la plataforma continental, además se observa que a mayor ancho de plataforma, mayor es el impacto del tsunami.

Bai et al. (2015) estudiaron los patrones de oscilación en toda la cuenca del Pacífico del tsunami generado por el terremoto de Tohoku (2011, Mw 9.0), lo anterior a través de un análisis espectral de la superficie libre modelada del evento. Para la simulación, se utilizó el modelo numérico NEOWAVE con un tiempo de cálculo de 72h y mallas de 2' de resolución (~3600 m). Los resultados de la simulación son coherentes con las mediciones de las 29 boyas DART distribuidas en toda la cuenca. En la publicación se identificaron elaborados patrones de ondas estacionarias y cuasi estacionarias a lo largo de todo el Océano Pacífico, destacando que la mayoría de los modos de oscilación deducidos del tsunami tienen una fuerte direccionalidad entre Japón y Chile. Finalmente, se concluye que la interconexión de las oscilaciones observadas a través del Pacífico explica la existencia de las oscilaciones persistentes registradas por las boyas DART durante el Tsunami.

Cisterna (2014) estudió los modos naturales de oscilar de la Bahía de Coliumo mediante funciones ortogonales empíricas (EOF). Para ello, generó seis perturbaciones en la bahía para cada uno de los tres diámetros de perturbación inicial, correspondientes a 0.5, 1 y 1.5 km, esto mediante el modelo numérico TUNAMI-N, considerando 8 h de simulación y mallas de hasta 1'' de resolución (~30 m). Además, simuló los eventos de 1960 y 2010 mediante el modelo numérico NEOWAVE, considerando 8h de simulación para el evento de 1960 y 6h para el evento de 2010 con mallas de hasta 1'' de resolución (~30 m), así obtuvo series de tiempo y espectros de energía tanto en la plataforma continental como al interior de la bahía, lo anterior para contrastar los resultados con los periodos naturales de oscilar de la zona en estudio. La investigación concluye que las grandes inundaciones observadas tanto para el evento de 1960 como el de 2010 se debieron a que los tsunamis excitaron el modo fundamental de la Bahía de Coliumo.

Aravena (2016) determinó los periodos resonantes de las bahías de Coliumo, Concepción y San Vicente utilizando el método de análisis espectral en mareógrafos. En este método se busca comparar la distribución energética propia de la bahía, denominada "oscilación de fondo" con aquella propia de los eventos de tsunami. De acuerdo a lo anterior, el autor utilizó datos medidos en mareógrafos y los dividió en dos grupos de registros, el primero corresponde a mediciones sin eventos de tsunami y el segundo corresponde a registros para los tsunamis de Tohoku (2011), Iquique (2014) y Coquimbo (2015). 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, esto permite cuantificar que parte de la respuesta de la bahía se debe a resonancia local. Finalmente se concluye que los resultados obtenidos en la investigación son coherentes con los estimados por otros autores para la misma zona con métodos diferentes, lo cual valida la información obtenida.

La tabla 1 muestra los periodos resonantes reportados por los autores anteriormente mencionados.

**Tabla 1:** Periodos resonantes encontrados por cada autor para la zona en estudio.

| Autor(es)                | Ubicación de los periodos resonantes | Periodos Resonantes (min) |        |    |    |    |    |    |    |       |    |       |    |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------|----|----|----|----|----|----|-------|----|-------|----|
|                          |                                      |                           |        |    |    |    |    |    |    |       |    |       |    |
| Yamazaki & Cheung (2011) | Chile Centro-Sur                     | 129                       | 93     | 79 | 73 | 64 | 54 | 46 | -  | 35    | -  | -     | -  |
| Bai et al. (2015)        | América del sur                      | -                         | -      | 80 | -  | 64 | 53 | 44 | -  | 32    | -  | 15    | -  |
| Cisternas (2014)         | Bahía de Coliumo                     | -                         | -      | -  | -  | -  | -  | -  | -  | 30    | -  | -     | 10 |
| Aravena (2016)           | Bahía de Concepción                  | -                         | 102/89 | -  | 73 | -  | 50 |    | 39 | 34    | 29 | 22/18 | -  |
|                          | Bahía de Coliumo                     | -                         | 102    | -  | 73 | -  | 50 | 46 | 38 | 34/32 | 28 | 24    | -  |

El objetivo de la presente investigación es hallar las razones de la gran inundación producida en Dichato para el tsunami de Japón el año 2011 y además argumentar por qué no sucedió lo mismo en Talcahuano si ambas localidades se encuentran en bahías con similares configuraciones en planta y son próximas entre sí. Para ello, se realizará un análisis espectral bidimensional de la superficie libre modelada del evento para dilucidar la presencia de ondas estacionarias o cuasi estacionarias. Por otro lado, se combinarán análisis espectral en mareógrafos y análisis modal a fin de encontrar los periodos resonantes de las bahías y sus patrones espaciales

de amplificación, dictaminando finalmente si los efectos producidos por del tsunami de Japón en Talcahuano y Dichato se debieron a la excitación de los periodos resonantes de las respectivas bahías. Adicionalmente, los resultados del presente estudio pretenden aportar a los “Atlas de resonancia” para las costas de Chile, realizados recientemente para la zona centro norte por Pablo Cortés y Patricio Catalán en colaboración con el CIGIDEN (2016).

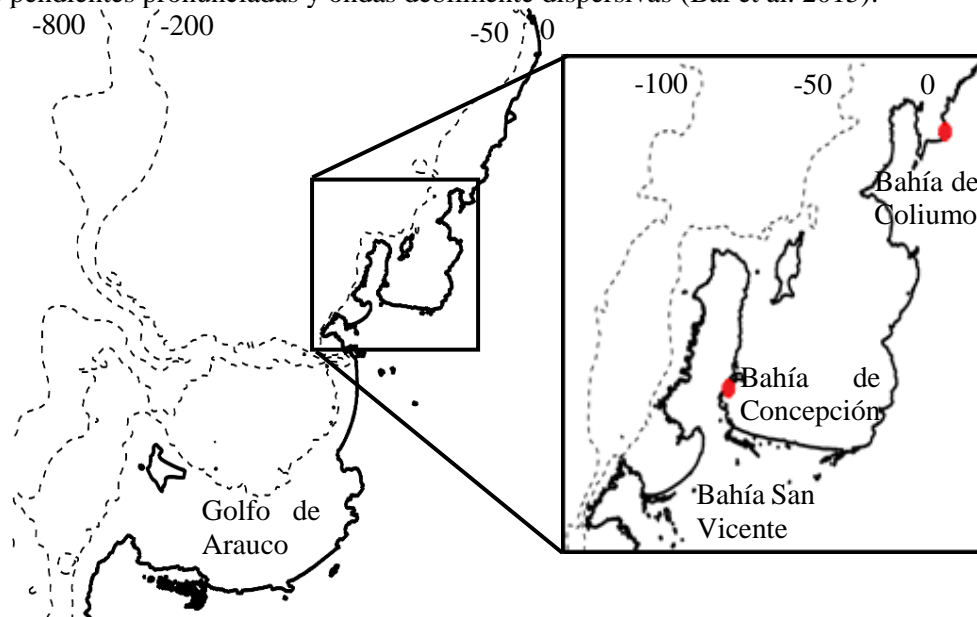
El capítulo 2, detalla los materiales y métodos empleados en el presente estudio. El capítulo 3, muestra los resultados obtenidos, los cuales se discuten posteriormente en el capítulo 4 y finalmente se presentan las conclusiones más relevantes en el capítulo 5.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

La resonancia se define como el fenómeno que ocurre cuando las frecuencias dominantes de la fuerza externa coinciden con las frecuencias propias de la bahía (Rabinovich, 2009), lo anterior es de suma importancia puesto que implica un eventual aumento en la amplitud de las ondas de tsunami y prolongación de la duración del mismo en la localidad afectada. Para caracterizar este fenómeno se suelen utilizar múltiples metodologías, entre éstas se encuentran: análisis espectral en mareógrafos (Rabinovich, 1997), análisis espectral en escenarios modelados (Yamazaki & Cheung, 2011) y análisis modal (Bellotti et al., 2012). Como ya se mencionó en el capítulo 1, en el presente estudio se implementarán las tres metodologías expuestas. A continuación, se muestran para cada uno de los métodos, las consideraciones más importantes para su implementación, como también las metodologías de selección y procesamiento de los datos.

### 2.1. Análisis espectral de la superficie libre modelada.

Para la realización de este apartado, se utilizó la misma simulación numérica del tsunami de Japón realizada por Bai et al. (2015), agregando a la ya existente malla 120'' (~3600m) de resolución, mallas anidadas de 30'' (~900m), 6'' (~180m) y 1'' (~30m) de resolución, las cuales otorgan mayor precisión de los cálculos en la zona de estudio, dicha zona está comprendida por las bahías de Coliumo, San Vicente y Concepción como se puede apreciar en la figura 2. Respecto del tiempo de simulación, cabe mencionar que se utilizaron 42 horas, lo cual es suficiente para captar reflexión y resonancia en el área de interés. La condición inicial del tsunami de 2011 se construyó a partir del modelo de fallas finitas propuesto por Yamazaki (2011), quien consideró 190 subfallas de 20x20 km con un strike de 192°. 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). La citada simulación fue realizada mediante el modelo numérico NEOWAVE, el cual se basa en las ecuaciones no lineales de aguas someras con una componente vertical de velocidad para considerar los flujos sobre pendientes pronunciadas y ondas débilmente dispersivas (Bai et al. 2015).



**Figura 2:** Malla anidadas con resolución de 6'' (Derecha) y 1'' (Izquierda). Los círculos rojos indican los puntos de interés en donde se capta la señal del tsunami simulado.

Para la validación del modelo, se utilizaron dos puntos para captar la señal del tsunami simulado (Ver figura 2), dichos puntos poseen la misma ubicación que los mareógrafos de las bahías de Coliumo (ausente durante el evento de Japón 2011) y Concepción. Los registros obtenidos se comparan tanto con las mediciones del mareógrafo durante el evento, para el caso de Talcahuano, como con los registros de inundación y run-up, para el caso de Dichato.

Validada la fuente sísmica y su propagación, se aplica sobre la superficie libre obtenida una transformada rápida de Fourier o FFT (por sus siglas en inglés), el método permite encontrar sistemas resonantes ya sean estacionarios o cuasi-estacionarios con sus respectivas propiedades, a saber, amplitud resonante, extensión espacial y ángulo de fase. Todo lo ya mencionado, permite realizar un análisis en detalle del fenómeno de resonancia en un dominio extenso, pero siempre asociado al evento modelado.

## 2.2. Análisis modal.

El modelo propuesto por Bellotti et al. (2012) se basa en la ecuación lineal de ondas de aguas someras, es decir:

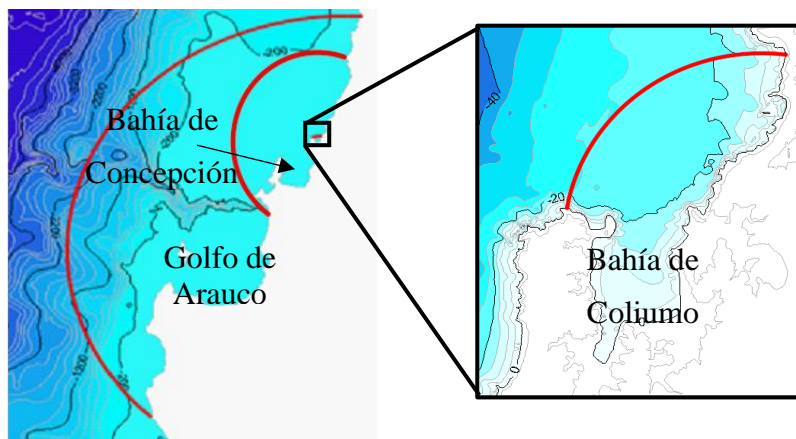
$$n_{tt} - \nabla gh \nabla n = 0 \quad (1)$$

Donde  $g$  representa la aceleración de gravedad,  $t$  representa el tiempo,  $h$  es la profundidad sin perturbaciones y  $n$  representa la superficie libre del agua. En este método el dominio corresponde a una porción de costa encerrada por un arco de circunferencia de radio  $R$ , cuyo centro corresponde a la fuente de las ondas que se propagan radialmente. Sobre el borde costero se aplica una condición matemática de reflexión total y una segunda condición aplica sobre el arco de circunferencia, la cual representa una condición de radiación aproximada. Las ecuaciones que describen a cada una de las condiciones o fenómenos anteriormente citados, son llevadas a una formulación débil, sobre la cual se aplican técnicas usuales de elementos finitos para transformar dicha formulación en un sistema de ecuaciones lineales. Finalmente se obtiene un problema de tipo:

$$s^2[M] + s[C] + [K] = 0 \quad (2)$$

El cual es cuadrático en  $s$  y admite como soluciones valores y vectores propios, los que representan los posibles modos naturales (valores) y su distribución espacial de amplitudes (vectores).

La figura 3 muestra la batimetría de la región analizada. Se utilizaron tres dominios y sus límites semicirculares abiertos, se indican también en la Figura 3 con líneas rojas gruesas. La costa delimitada por el dominio más grande va aproximadamente desde Tirúa en el extremo Sur hasta Cobquecura en el extremo Norte. Este dominio se utilizó para encontrar modos resonantes asociados a la plataforma continental, lo cual se consigue incluyendo el contorno de los 200m de profundidad dentro del arco de circunferencia. El segundo dominio de mayor tamaño va desde la desembocadura del río Bío-Bío en extremo sur hasta la desembocadura del río Taucú en el extremo norte, dicho dominio se utilizó para identificar el posible comportamiento en conjunto de las bahías de Coliumo, San Vicente y Concepción. El dominio más pequeño se utilizó con el fin de identificar mejor los modos de la Bahía de Coliumo, teniendo en cuenta las características de pequeña escala con mayor precisión.



**Figura 3:** Batimetría de la zona de estudio, las líneas rojas indican el límite abierto de los dos dominios utilizados.

### 2.3. Análisis espectral en mareógrafos.

Rabinovich (1997) plantea que las oscilaciones del nivel del mar durante un evento de tsunami pueden ser representadas por:

$$\zeta_{\text{obs}}(t) = \zeta_t(t) + \zeta_b(t) + \varepsilon(t) \quad (3)$$

Representando las señales de tsunami, fondo y ruido instrumental respectivamente.

La principal hipótesis del método es que el tsunami  $S_t(\omega)$  y las observaciones costeras de fondo  $S_b(\omega)$  son el resultado de una transformación de las ondas largas de aguas profundas.

$$S_t(\omega) = Y_t(\omega)P_t(\omega)Q_t(\omega)Z(\omega) \quad (4)$$

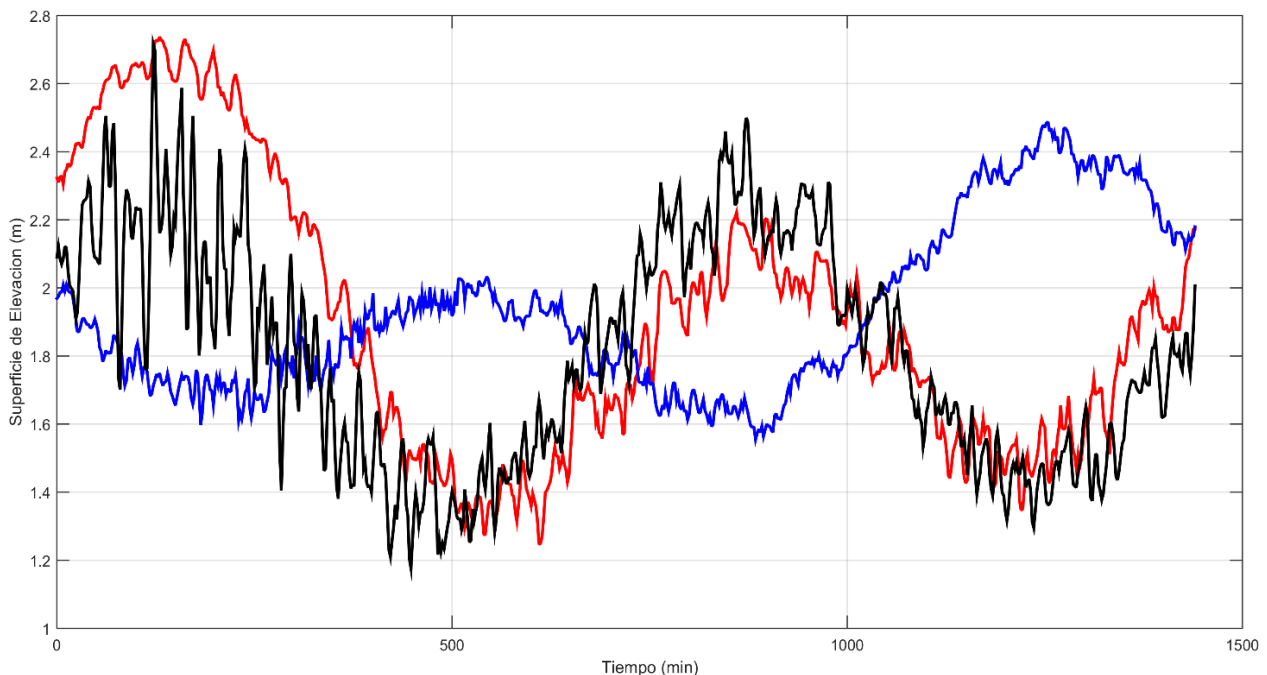
$$S_b(\omega) = P_b(\omega)Q_b(\omega)S_0(\omega) \quad (5)$$

En donde,  $Z(\omega)$  es el espectro de tsunami cerca del origen,  $S_0(\omega)$  es el espectro de fondo en aguas profundas, las funciones  $Y$ ,  $P$  y  $Q$  se asocian a la propagación oceánica, la propagación sobre la plataforma continental y los efectos de las bahías, respectivamente. Además, Rabinovich (1997) concluye que el espectro de fondo en aguas profundas  $S_0(\omega)$  no posee picos definidos con lo que se puede establecer que los picos en los espectros costeros  $S_b(\omega)$  provienen de las funciones de admitancia. Por lo tanto, el espectro de la medición en el mareógrafo en ausencia de tsunami permite definir los períodos candidatos a ser exacerbados en caso de que exista resonancia. Por otra parte, la señal completa se utiliza como referencia, a modo de estudiar cuáles son los períodos resonantes excitados por los diferentes eventos a considerar en el estudio (Cortés, 2016).

En la presente investigación, el espectro de fondo de Talcahuano se construyó a partir de un año de mediciones, entre los meses de mayo de 2014 y mayo de 2015 (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>). Por otro lado, el espectro de fondo de Dichato se construyó a partir de 3 semanas de mediciones entre 12 de mayo de 2016 y 1 de junio del año 2016 (Aravena, 2016).

Adicionalmente al evento de Japón 2011, se analizaron 3 eventos de tsunami de campo lejano para Talcahuano entre los que se encuentran Kuril 2006, Kuril 2007 y Océano Índico 2004, lo anterior se realiza para dilucidar cuáles son los períodos resonantes excitados preferentemente por este tipo de eventos, las series de tiempo muestran en la figura 4.

Posterior a la obtención de las series de tiempo registradas por los mareógrafos, se procede a filtrar la marea astronómica de los registros mediante algoritmos en MATLAB. Cabe destacar, que la longitud de los registros para el análisis de cada una de las series de tiempo con y sin presencia de un evento de tsunami es de 24 horas, esto es debido a que con dicha duración prolongada se obtiene una buena resolución espectral, que además es común para todos los eventos.



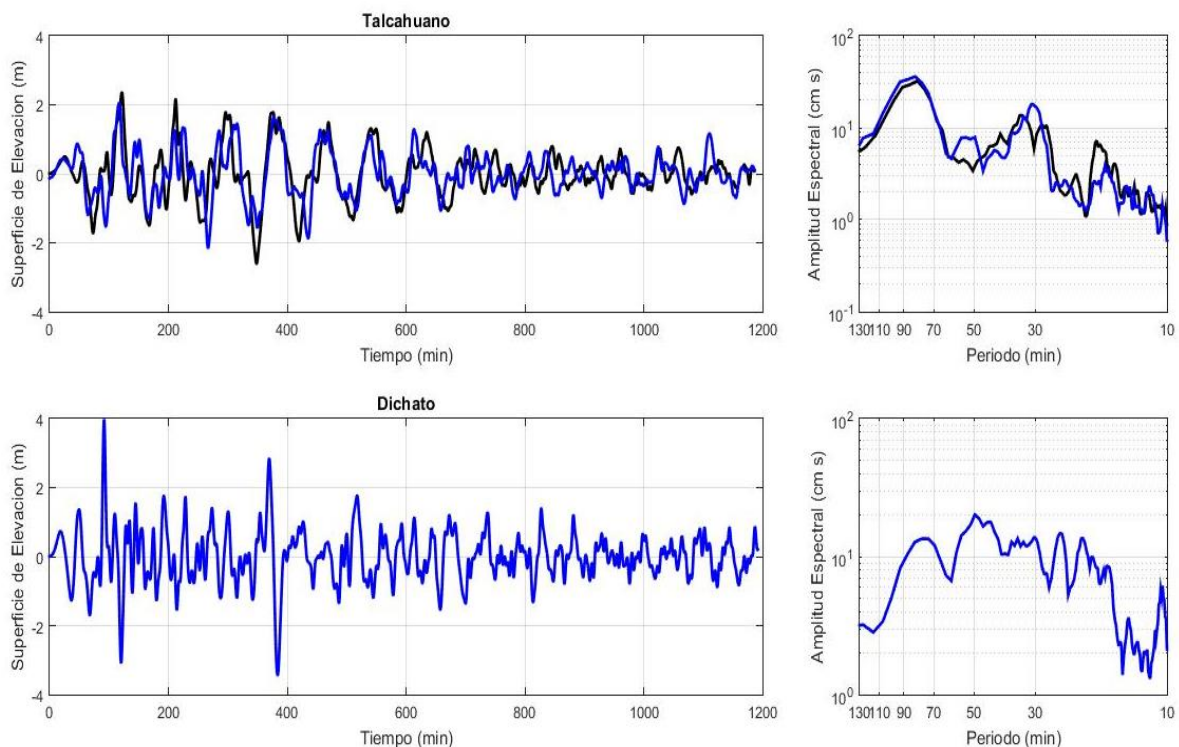
**Figura 4:** Series de tiempo de los eventos de Kuril 2006 (negro), Kuril 2007 (azul) y Océano Índico 2004(rojo).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Análisis espectral de la superficie libre modelada.

La figura 5 muestra las series de tiempo registradas y calculadas en un intervalo de 20h para ilustrar el comportamiento de las ondas del tsunami desde su arribo a las respectivas localidades, dicha figura de igual forma muestra los espectros de energía estimados en intervalos de 24 horas a fin de identificar oscilaciones persistentes. De la figura, se puede apreciar que los datos calculados y registrados tanto en Dichato como en Talcahuano muestran oscilaciones sostenidas, además se puede observar que las ondas más destructivas se manifiestan después de la llegada del primer frente del tsunami, todo lo anterior es consistente con el fenómeno de resonancia, al cual se enfoca el presente estudio.

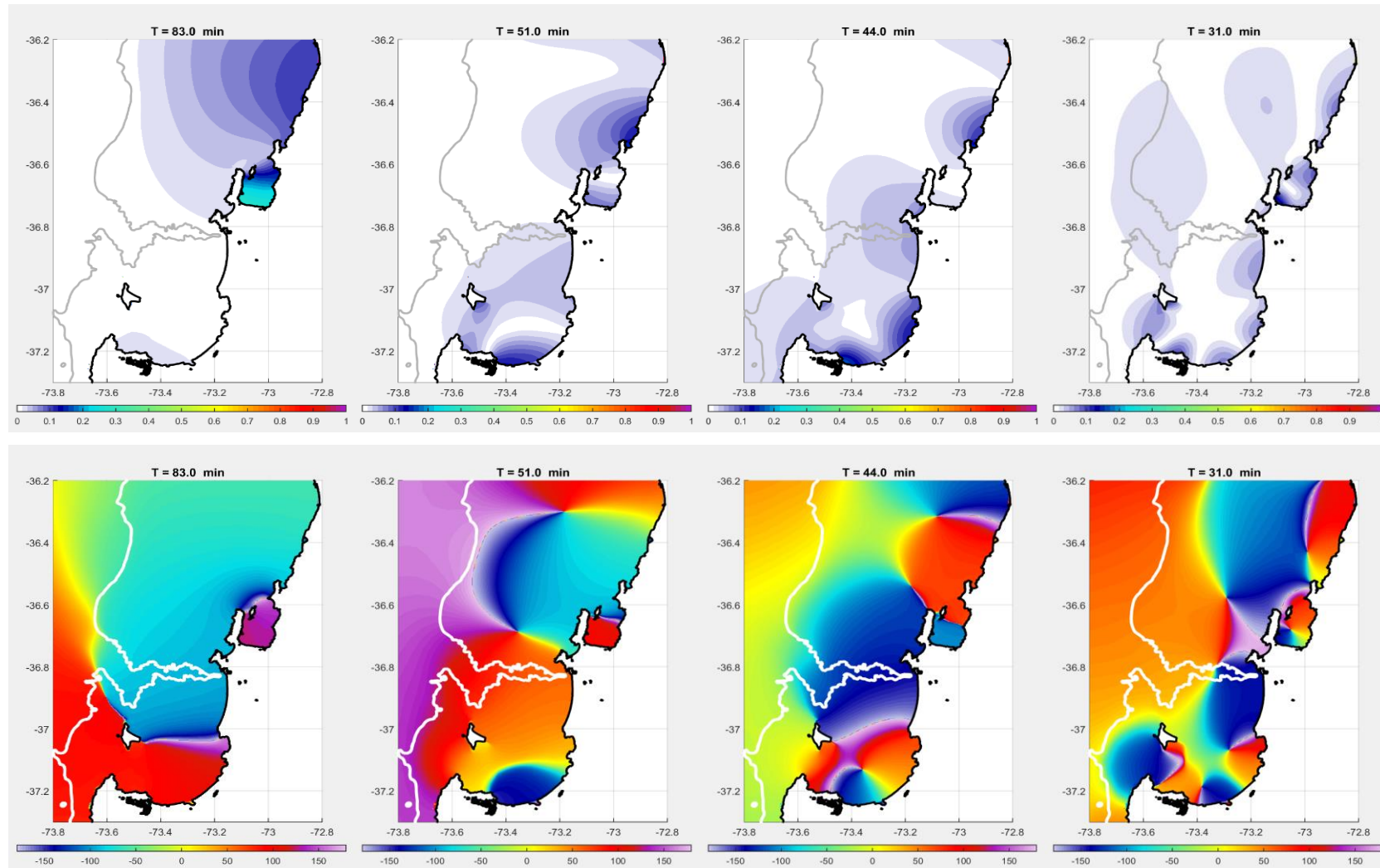
En Talcahuano, la simulación del tsunami se ajusta bien a los datos medidos, tanto en amplitudes de onda como en energía espectral. En cuanto a Dichato, la máxima amplitud de onda cercana a los 4m, coincide con lo registrado por Aránguiz y Shibayama (2013). Todos los antecedentes ya mencionados, permiten validar la simulación numérica dando lugar a un análisis en profundidad de la resonancia.



**Figura 5:** Series de tiempo (izquierda) y espectros de energía (derecha), las líneas negras y azules indican los datos registrados y simulados respectivamente.

Una vez validada la simulación, se aplica una transformada rápida de Fourier o FFT sobre la superficie libre, lo anterior permite obtener amplitud, extensión espacial y ángulo de fase de cada modo resonante, los modos seleccionados son los que poseen mayor amplitud espectral en los mapas 2-D y que preferentemente se encuentran como picos en los espectros de energía de la figura 5.

La figura 6 muestra la amplitud espectral y ángulo de fase de los cuatro modos de oscilaciones dominantes, estos poseen periodos entre los 31 y 83 minutos con nodos y antinodos bien definidos indicativos de resonancia. El primer modo resonante tiene un gran ancho de banda centrado en los 83 minutos, lo cual se aprecia en el espectro de energía de Talcahuano, se percibe un sistema estacionario con una línea nodal bien definida entre Tomé y Hualpén, la máxima amplificación de energía se centra en la Bahía de Concepción. Los modos de 51 y 44 minutos poseen una estructura estacionaria similar con amplificaciones de energía en la Bahía de Coliumo y nodos ubicados en Cobquecura, Hualpén/Talcahuano y Tomé. Nodos en mar abierto y múltiples nodos y antinodos que a lo largo de la costa se pueden apreciar a los 31 minutos de periodo, en donde la máxima amplificación se produce en Talcahuano.



**Figura 6:** Amplitud espectral (arriba) y ángulo de fase (abajo) de los modos resonantes presentes en las costas de la región del Bío-Bío. Las líneas grises/blancas indican el contorno de 200 metros de profundidad.

### 3.2. Análisis modal.

Los resultados obtenidos del análisis modal se componen por siete valores propios asociados a la plataforma continental (indicados con la letra P) los cuales se muestran en las figuras 7 y 8, seis valores propios asociados a las bahías del gran Concepción (señalados con la letra B) y exhibidos en las figuras 9 y 10; y tres valores propios asociados a la Bahía de Coliumo (designados con la letra C) que se enseñan en la figura 11. Estos valores, de igual forma se representan en la figura 12 como referencia.

El valor propio 1P posee un periodo igual a 98.65 minutos y se correlaciona bien con el valor propio 1B de 93.34 minutos, lo anterior a pesar de la diferencia de 5.31 minutos entre los periodos. La amplitud de estos valores propios es máxima dentro de la Bahía de Concepción y evidencian presencia de ondas estacionarias. Notar que estos valores aparecen en el espectro de Talcahuano con una gran cantidad de energía asociada.

El valor propio 2P tiene un periodo de 68.41 minutos, su máxima amplitud se sitúa en la Bahía de Coliumo y a su vez en la Bahía de Concepción. El gráfico de fases, muestra una línea nodal entre las localidades de Hualpén y Tomé con presencia de ondas estacionarias. El valor propio, aparece en el espectro de Dichato y Talcahuano como pico de mediana energía.

El valor propio 3P de 46.68 minutos de periodo concuerda bastante bien con el valor propio 2B de 48.03 minutos, ambos tienen una estructura compleja que indica presencia ondas progresivas o cuasi estacionarias. La amplitud de estos valores propios es máxima en la Bahía de Coliumo y se aprecian en el espectro de Dichato con una mediana cantidad de energía asociada.

El valor propio 4P de 37.09 minutos de periodo es concordante con el valor propio 3B de 41.29 minutos, ambos poseen una estructura estacionaria similar a los valores propios 5P y 4B de 32.97 minutos de periodo y 32.85 minutos respectivamente, que de igual forma son compatibles. La amplitud de estos valores propios es máxima, tanto en la Bahía de Concepción como en la Bahía de Coliumo. Además, se aprecian en los espectros de Dichato y Talcahuano como picos de energía distintivos.

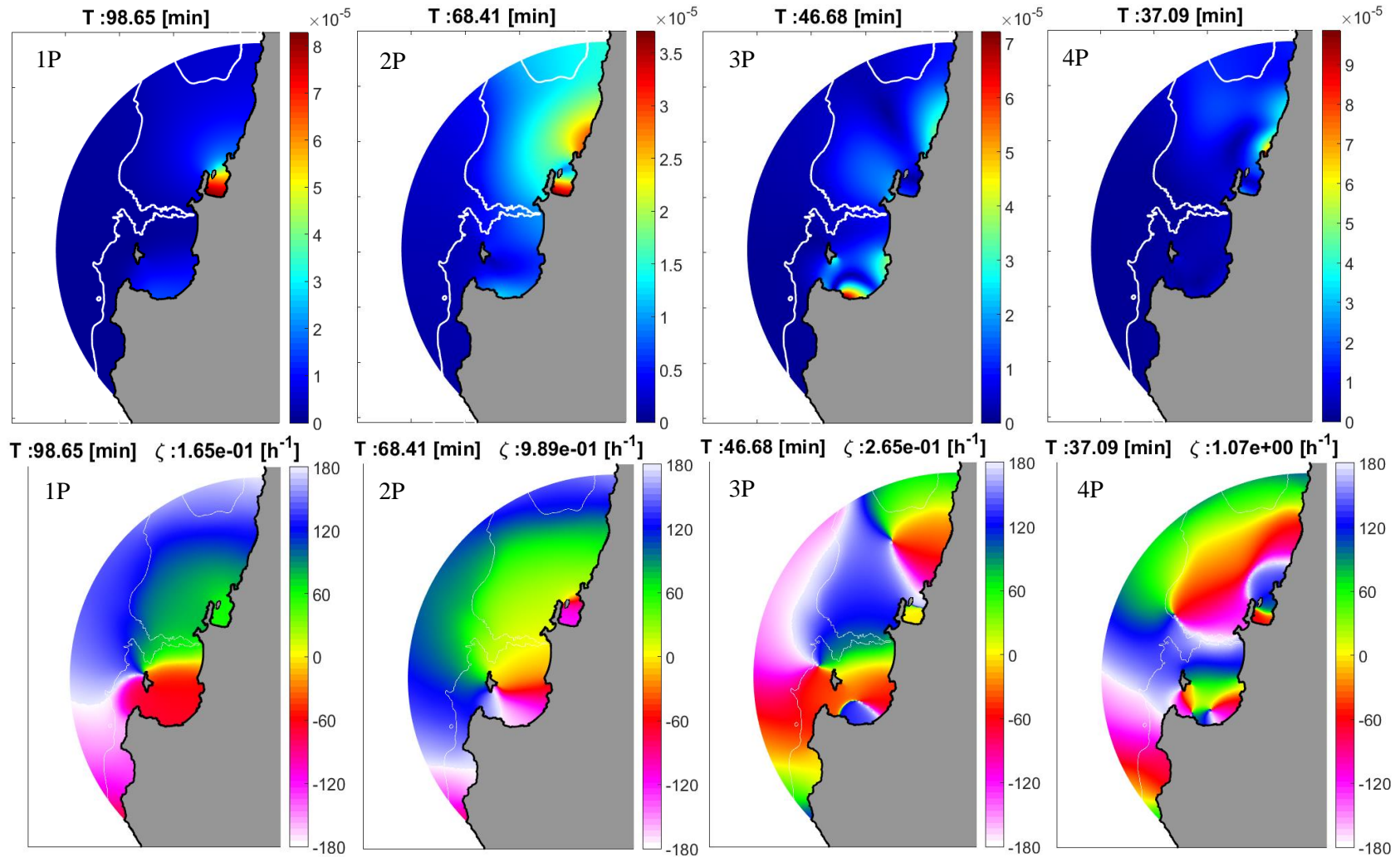
El valor propio 6P posee un periodo igual a 28.46 minutos y se correlaciona muy bien con el valor propio 5B de periodo igual a 27.49 minutos. Estos valores propios, tienen una estructura compleja semejante a los valores propios 7P y 6B de 27.85 y 26.08 minutos de periodo que a su vez, son concordantes. Esta estructura compleja, puede interpretarse como ondas progresivas o cuasi estacionarias. La amplitud del primer par de valores propios es máxima en la Bahía de Concepción y la del segundo par es máxima en la Bahía de Coliumo. Notar que estos valores propios aparecen en los espectros de Talcahuano y Dichato como picos espectrales.

Los valores propios 2C y 3C de 15.25 y 7.87 minutos respectivamente, evidencian la presencia de ondas estacionarias, en cambio el valor propio 1C de 25.03 minutos, exhibe presencia de ondas cuasi estacionarias, lo cual es acorde a lo observado en los valores propios 7P y 6B asociados a dominios de mayor tamaño, lo anterior implica que estos dominios más extensos fueron capaces de captar de buena forma las características locales de la Bahía de Coliumo. La amplitud de todos los valores propios es máxima en la desembocadura del estero Coliumo y se aprecian como picos de energía diferenciados en el espectro de Dichato.

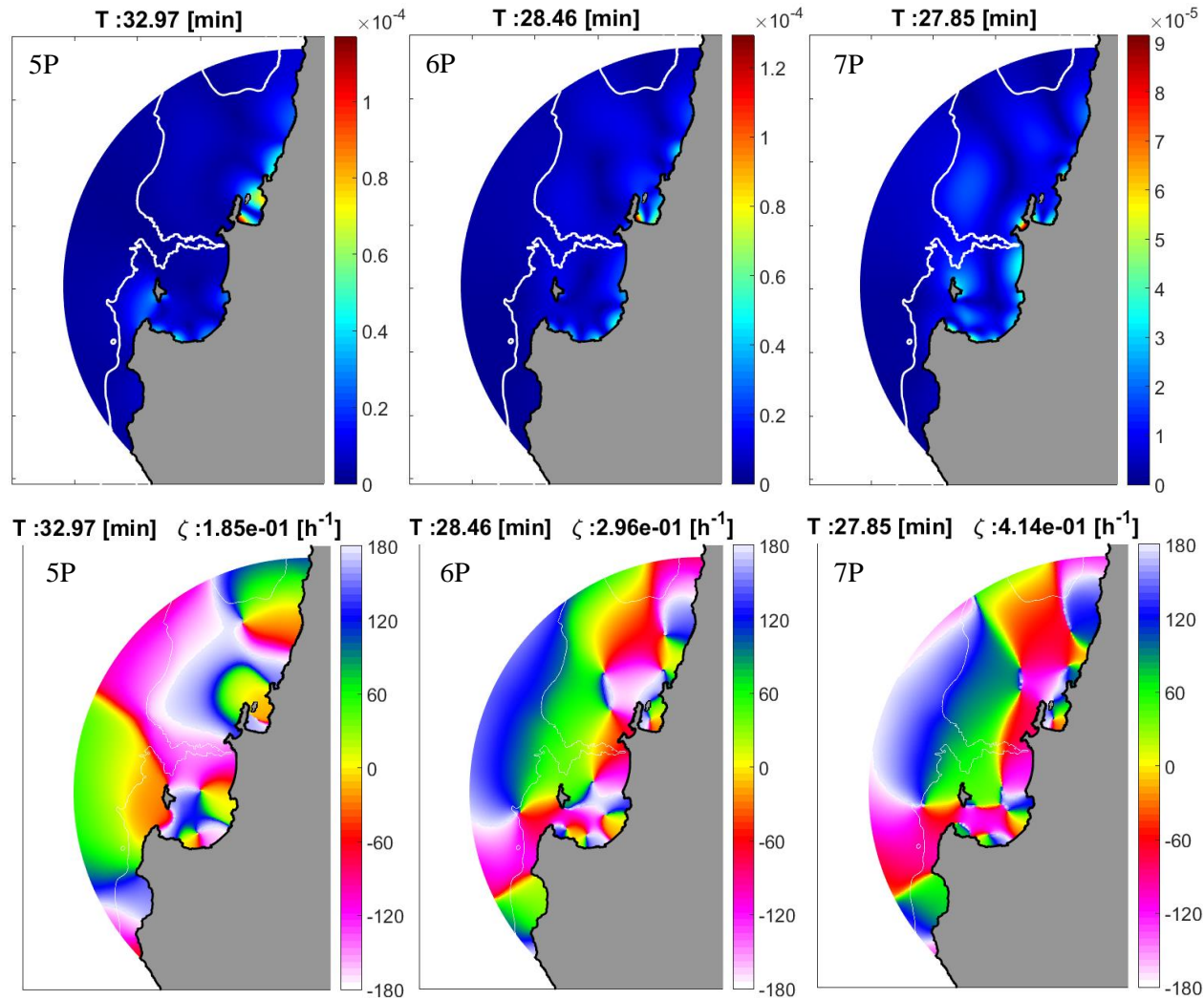
### 3.3. Análisis espectral en mareógrafos.

En función de la metodología propuesta Rabinovich (1997), se procede a comparar los espectros de fondo con los espectros de tsunami, tal como se muestra en la figura 12, lo anterior permite identificar los periodos que se excitan prioritariamente en la llegada de un tsunami a la costa.

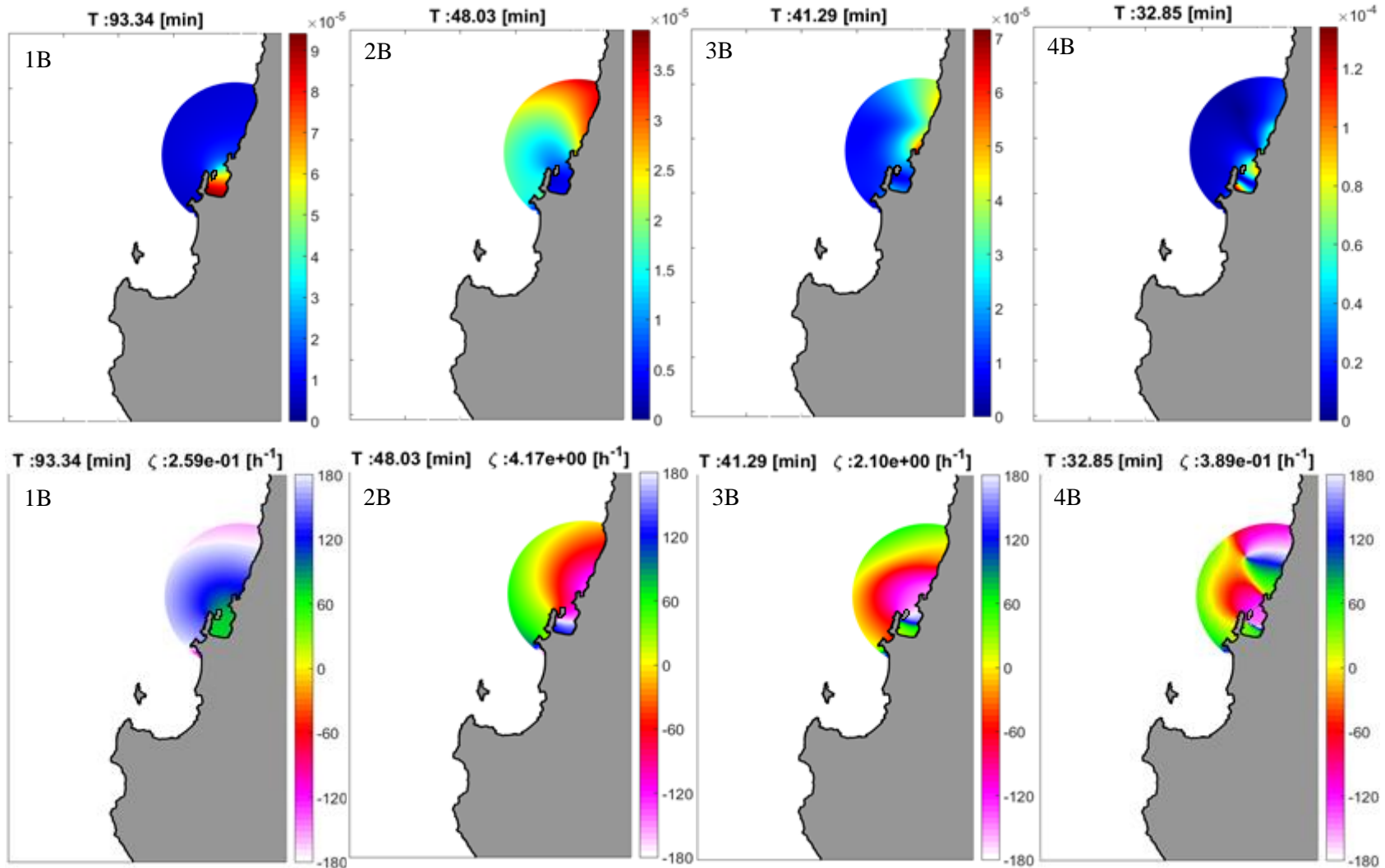
En la figura 12 se observa que en Talcahuano los diversos espectros de tsunami y el espectro de fondo poseen una estrecha similitud, revalidando lo expuesto por Rabinovich (1997). En este sector, la energía espectral se concentra principalmente en torno a los 98 minutos, no obstante se aprecia una concentración de picos espectrales distintivos dentro de la banda de 28-40 minutos. Por otro lado, en Dichato se puede apreciar una gran banda energética entre los 20 y 90 minutos, sin picos notoriamente distintivos.



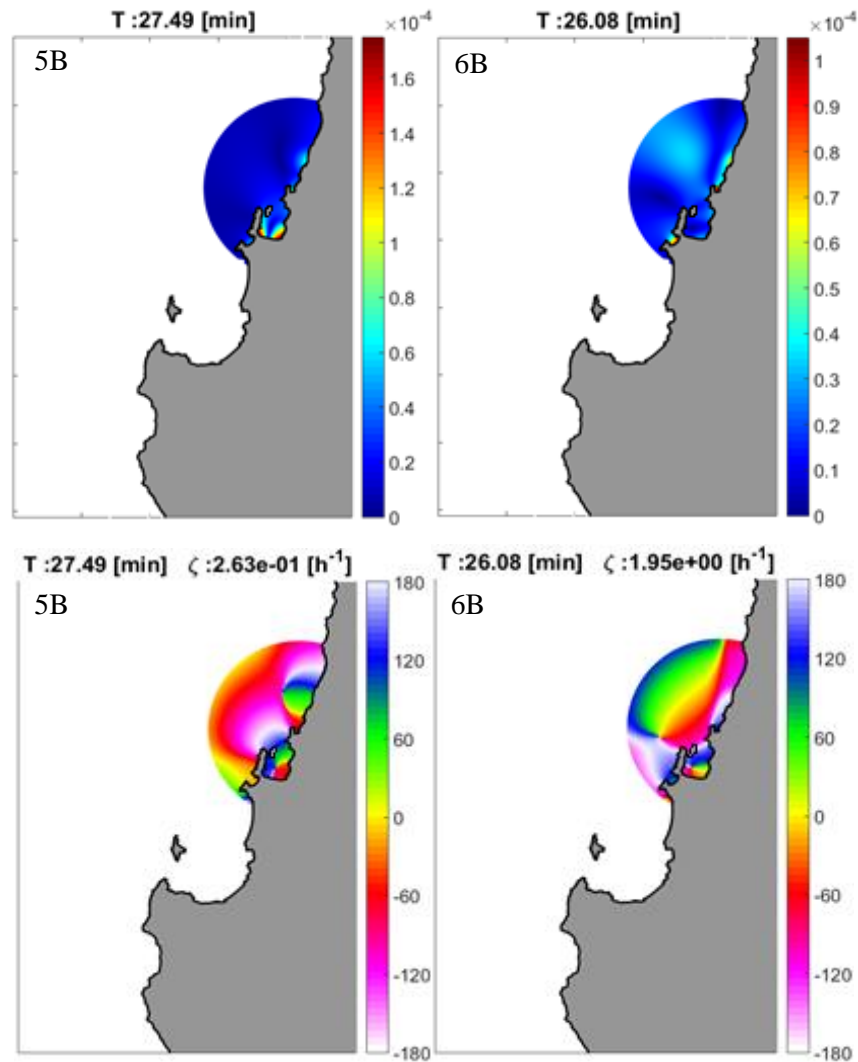
**Figura 7:** Mapas de amplitud (arriba) y de fase (abajo) para cada uno de los primeros cuatro valores propios identificados en el dominio extenso. La línea blanca indica el contorno de 200 metros de profundidad.



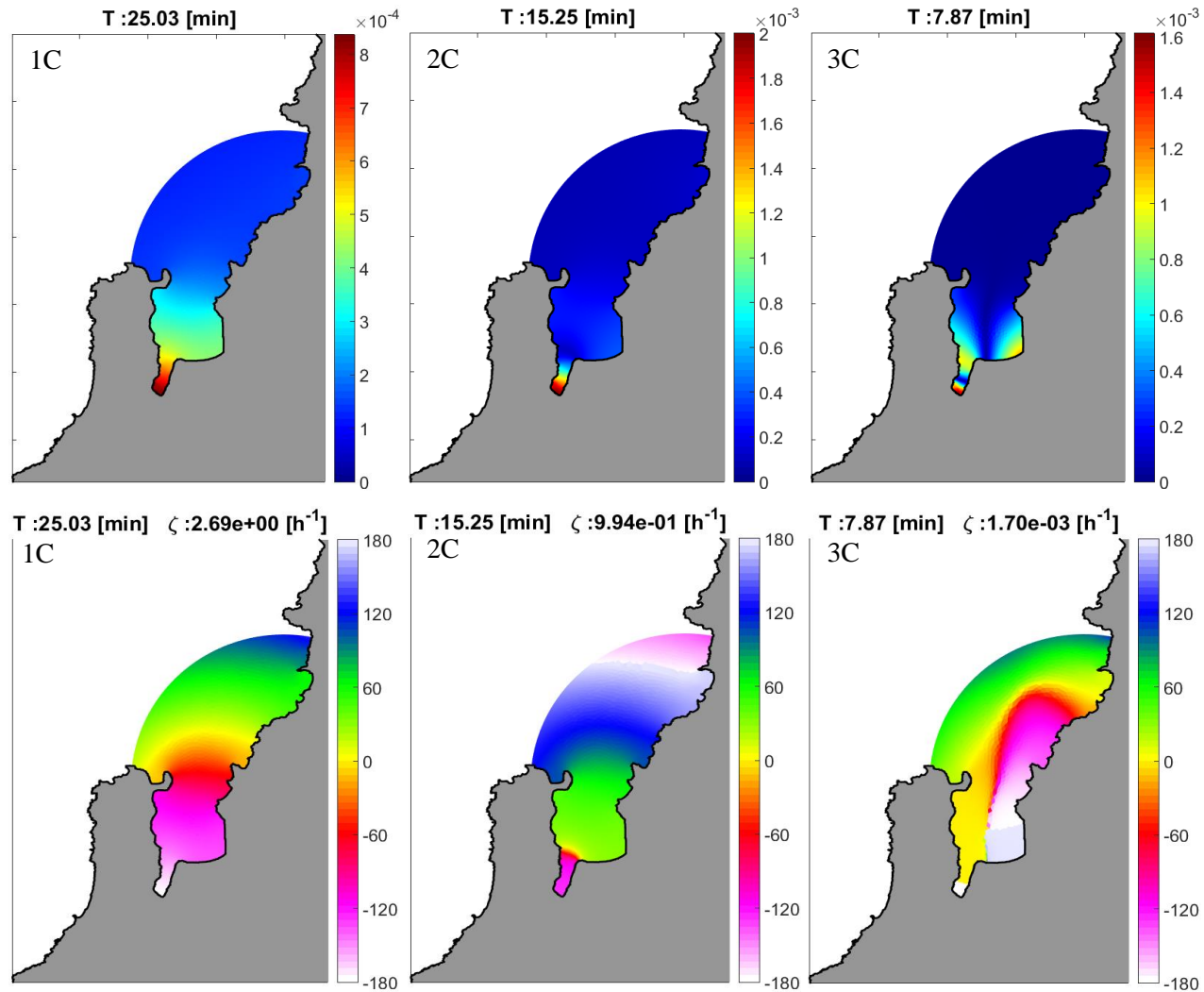
**Figura 8:** Mapas de amplitud (arriba) y de fase (abajo) para cada uno de los tres valores propios restantes identificados en el dominio extenso. La línea blanca indica el contorno de 200 metros de profundidad.



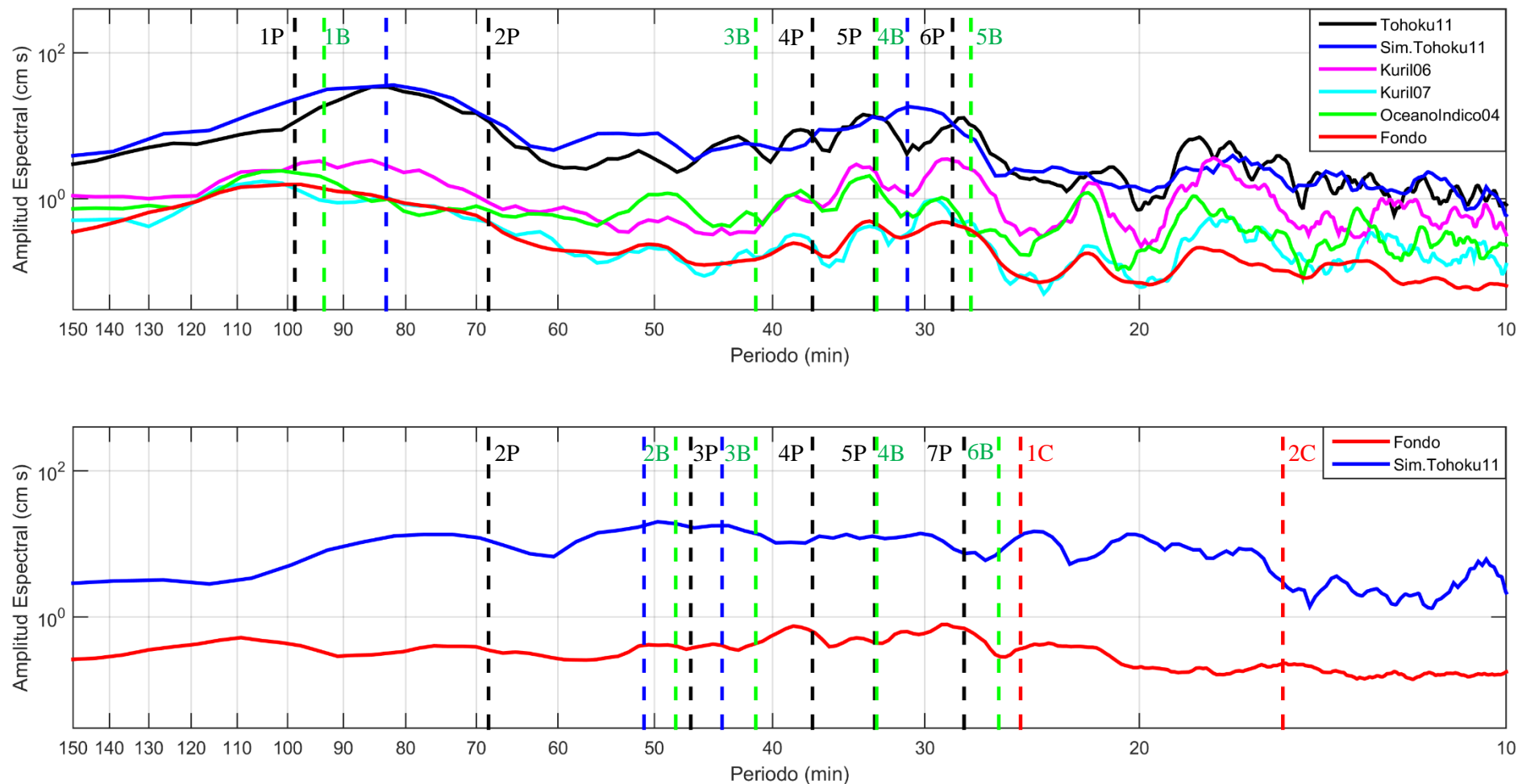
**Figura 9:** Mapas de amplitud (arriba) y de fase (abajo) para cada uno de los primeros cuatro valores propios identificados en las bahías del Gran Concepción.



**Figura 10:** Mapas de amplitud (arriba) y de fase (abajo) para cada uno de los dos valores propios restantes identificados en las bahías del gran Concepción.



**Figura 11:** Mapas de amplitud (arriba) y de fase (abajo) para cada uno de los valores propios identificados en la Bahía de Coliumo.



**Figura 12:** Espectros de fondo y de tsunami para Talcahuano (arriba) y Dichato (abajo). Las líneas verticales segmentadas, representan modos resonantes obtenidos mediante: Análisis espectral bidimensional (azul) y análisis modal (negro: modos asociados a la plataforma continental/verde: modos asociados a las bahías del gran Concepción/rojo: modos asociados a la Bahía de Coliumo).

#### **4. DISCUSIÓN**

Es importante mencionar que al coincidir los valores propios con los periodos resonantes de las bahías en estudio (ver figura 12), estos pasan de ser un mero resultado matemático del análisis modal a ser modo resonante con significado físico.

Es relevante destacar que para el evento de Japón 2011, tanto el análisis espectral bidimensional como los espectros de energía, indican la excitación de los modos naturales de las bahías en estudio es decir, se produjo resonancia. Lo anterior permite reafirmar que los modos naturales de oscilar son sumamente relevantes para la respuesta de tsunamis en la costa.

Uno de los objetivos del presente estudio es identificar las condiciones resonantes que eventualmente pueden ser excitadas por los tsunamis durante su propagación hacia la costa. Por lo anterior, resulta adecuado correlacionar los modos encontrados en el presente estudio con los modos registrados en trabajos previos para la zona de análisis (ver Capítulo 1). La tabla 2, permite apreciar que la mayoría de los modos hallados en el presente trabajo se reportaron anteriormente por otros autores, aun cuando estos aplicaran métodos distintos a los que aplica el autor, lo que reafirma o valida la presencia de estos modos con los periodos, fases y amplitudes que los caracterizan. Estas oscilaciones resonantes, explican las señales sostenidas que típicamente caracterizan a las ondas del tsunami captadas por los mareógrafos en las costas chilenas.

#### **5. CONCLUSIONES**

La gran inundación observada en Dichato producto del tsunami de Japón del año 2011 se puede asociar a dos grandes causas. La primera, corresponde a la excitación de múltiples modos resonantes ubicados entre los 20 y los 90 minutos de periodo, los cuales se asocian principalmente a la plataforma continental, lo anterior se traduce en amplificaciones considerables de las ondas del tsunami las que además, abarcan gran parte de la bahía. La segunda, se asocia a la geomorfología, específicamente a la escasa superficie y profundidad de la bahía y la existencia de cerros en todo el borde sur de la localidad, estos últimos constituyen un límite para la expansión horizontal de las masas de agua. Su efecto en conjunto, conlleva a que la bahía no pueda acumular en un corto tiempo el gran volumen de agua que penetra a gran velocidad llenando así los únicos espacios libres que corresponden al estero Coliumo y la componente vertical. Dicha inundación no fue tan devastadora en Talcahuano, porque precisamente estos dos fenómenos no se desarrollan, en específico se excitan modos puntuales por lo que el total de energía que se asocia al evento en la bahía es considerablemente menor, asimismo en proporción la bahía de Concepción es notablemente más grande y profunda, además posee una extensa planicie ubicada en su extremo sur donde se sitúa la localidad, todo lo anterior permite que la masa de agua a la cual ya se le asocia una menor energía, pueda penetrar muchos metros hacia el interior de la ciudad sin producir una inundación significativa. Notar que en esta afirmación no se considera la ubicación de la fuente de generación del tsunami respecto de las localidades, ni la orientación y forma en planta de estas debido a que todas las mencionadas propiedades son aproximadamente iguales.

Respecto del fenómeno observado en Dichato, es importante destacar que en Chile existe una gran cantidad de localidades costeras, rodeadas de importantes cerros y situadas en bahías con morfologías similares a las de Coliumo en cuanto a la forma en planta y profundidad. Según lo ya expuesto, dichas bahías son sumamente vulnerables puesto que si las frecuencias dominantes del tsunami coinciden con las frecuencias propias de la bahía, los daños e inundaciones serán seguramente de consideración.

Este trabajo continúa resaltando la importancia de conocer el comportamiento de los tsunamis en cada localidad costera a fin de ordenar los territorios en función de las amenazas, proponer medidas de mitigación personalizadas y manejar adecuadamente potenciales emergencias.

**Tabla 2:** Comparación de modos resonantes entre el actual trabajo y estudios previos.

| Autor(es)                | Método utilizado                  | Modos ubicados en   | Periodos Resonantes (min) |        |    |    |    |    |       |       |       |          |    |    |    |
|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------------|--------|----|----|----|----|-------|-------|-------|----------|----|----|----|
|                          |                                   |                     | 129                       | 93     | 79 | 73 | 64 | 54 | 46    | -     | 35    | -        | -  | -  |    |
| Yamazaki & Cheung (2011) | Análisis espectral 2-D            | Chile Centro Sur    | 129                       | 93     | 79 | 73 | 64 | 54 | 46    | -     | 35    | -        | -  | -  | -  |
| Bai et al. (2015)        | Análisis espectral 2-D            | América del sur     | -                         | -      | 80 | -  | 64 | 53 | 44    | -     | 32    | -        | -  | 15 | -  |
| Cisternas (2014)         | EOF                               | Bahía de Coliumo    | -                         | -      | -  | -  | -  | -  | -     | -     | 30    | -        | -  | -  | 10 |
| Aravena (2016)           | Análisis espectral en mareógrafos | Bahía de Concepción | -                         | 102/89 | -  | 73 | -  | 50 | -     | 39    | 34    | 29       | 22 | 18 | -  |
|                          |                                   | Bahía de Coliumo    | -                         | 102    | -  | 73 | -  | 50 | 46    | 38    | 34/32 | 28       | 24 | -  | -  |
| Presente Trabajo         | Análisis espectral 2-D            | Bahía de Concepción | -                         | -      | 83 | -  | -  | -  | -     | -     | 31    | -        | -  | -  | -  |
|                          |                                   | Bahía de Coliumo    | -                         | -      | -  | -  | -  | 51 | 44    | -     | -     | -        | -  | -  | -  |
|                          | Análisis modal                    | Bahía de Concepción | -                         | 99/93  | -  | 68 | -  | -  | -     | 41/37 | 33    | 28/27    | -  | -  | -  |
|                          |                                   | Bahía de Coliumo    | -                         | -      | -  | 68 | -  | -  | 48/47 | 41/37 | 33    | 28/26/25 | -  | 15 | 8  |
|                          | Análisis espectral en mareógrafos | Talcahuano          | -                         | 98     | -  | -  | -  | 51 | -     | 38    | 33    | 29       | 22 | 18 | -  |
|                          |                                   | Dichato             | -                         | -      | -  | -  | -  | -  | 45    | -     | 34/31 | 29       | 24 | -  | -  |

## 6. AGRADECIMIENTOS

FONDECYT 1140424.

FONDAP 15110017.

## 7. REFERENCIAS

- **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., Shibayama, T.** (2013), *Effect of Submarine Canyons on tsunamis propagation: Case study of Biobio Canyon, Coast. Eng. J(55):22.DOI:10.1142/S0578563413500162.*
- **Aravena, E.** (2016). *Análisis 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.*
- **Bellotti, G., R. Briganti, G. M. Beltrami, and F. Leopoldo** (2012a), *Modal analysis of semi-enclosed basins, Coastal Engineering, 64 (0), 16–25.*
- **Bellotti, G., R. Briganti, and G. M. Beltrami** (2012b), *The combined role of bay and shelf modes in tsunami amplification along the coast, Journal of Geophysical Research, 117 (C8), C08027.*
- **Cisterna, N.** (2014). *Resonancia de Tsunami en la Bahía de Coliumo, Región del Biobío, Chile. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>*
- **Cortés, P.** (2015). *Estudio de Resonancia de Ondas Largas en la Plataforma Continental Chilena.*
- **Fritz, H. M., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Bariantos, S., Meneses, G., Valderas, C., Ebeling, C., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Dominguez, J. C., & Synondakis, C. E.,** (2011) *Field Survey on the 27 February 2010 Chilean Tsunami. Pure and Applied Geophysics, 2011, N° 168, p. 1989-2010.*
- **Okada, Y.,** (1985). *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space Bull. Seismol.Soc.Am.75 (4), 1135–1154.*
- **Rabinovich, A. B.** (1997), *Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects, Journal of Geophysical Research: Oceans, 102 (C6), 12663–12676.*
- **Rabinovich, A. B.** (2009). *Seiches and Harbour Oscillations. Handbook of Coastal and Ocean Engineering, 193–236.*
- **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, doi: 10.1029/2011GL047508.*
- **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.*
- **Yamazaki, Y., Lay, T., Cheung, K.F., Yue, H., Kanamori, H.,** (2011). *Modeling near field tsunami observations to improve finite-fault slip models for the 11 March 2011 Tohoku earthquake. Geophys. Res. Lett. 38, L00G15. doi:10.1029/2011GL049130.*