

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

IDENTIFICACIÓN DE PERIODOS RESONANTES EN LA COSTA NORTE DE CHILE MEDIANTE UN METODO DE PROPORCIONALIDAD ESPECTRAL

PABLO CORTES A.¹
PATRICIO CATALAN M.^{2,3,4}

RESUMEN

El análisis hidrodinámico de los recientes tsunamis de Maule 2010 y Pisagua 2014, ha puesto en evidencia que el comportamiento de ellos está altamente influenciado por la interacción de ondas estacionarias y cuasiestacionarias, de tipo resonante. Estos análisis, típicamente en el ámbito del análisis espectral, sugieren que la configuración topobatemétrica tiene una injerencia considerable en la respuesta en la costa respecto de la distribución inicial de la energía en las frecuencias, o la magnitud del sismo, entre otras.

Sin embargo, lo anterior se realiza usualmente sobre series de tiempo provenientes de la modelación computacional de eventos de tsunami, lo que previene la generalización de los resultados con miras al establecimiento de características bien definidas para cada localidad, las que pudiesen servir de base en la identificación de zonas más propensas a daños relevantes por impacto de tsunamis.

El presente trabajo se basa extensivamente en un método de razón de espectros que busca comparar la distribución energética propia de la bahía/plataforma, llamada “oscilación de fondo”, con aquella propia de los eventos de tsunami. La aplicación de esta metodología al tsunami de Tohoku de 2011 permite concluir que para el caso estudiado, un tsunami de campo lejano, la resonancia producto de las características locales juega un rol prominente en la transformación de los espectros desde aguas profundas hasta las dos bahías analizadas, Arica e Iquique. El método permite además obtener algunos valores de los periodos pico que existirían en la fuente, para posteriormente separar características propias de aquellas controladas por el terremoto generador.

¹ Alumno Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

² Profesor Adjunto, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

³ Investigador Asociado, Centro Nacional de Gestión Integrada de Desastres Naturales, CIGIDEN

⁴ Investigador Asociado, Centro Científico Tecnológico de Valparaíso, CCTVal

1. INTRODUCCIÓN

Extensivos estudios en la resonancia de tsunamis en la costa para distintos casos en el mundo han demostrado el rol fundamental de la configuración topo-batimétrica en la amplificación de la energía contenida en las olas cuando se acercan a la costa, (Henry and Murty, 1994; Munger and Cheung, 2006; Kowalik et al., 2008; Roeber et al., 2010; Tolkova & Power, 2011; Catalan et al., 2015). Adicionalmente, la interacción entre distintas frecuencias y modos estacionarios y progresivos han permitido explicar los arribos de olas tardías observados en Talcahuano 2010 y en Arica 2014.

Sin embargo, los trabajos anteriormente mencionados se basan principalmente en el contraste entre mediciones en mareógrafos y resultados obtenidos de la modelación de eventos mediante paquetes computacionales para la propagación del tsunami. Por otra parte, usualmente se analiza sólo el caso específico del tsunami, no quedando explícita qué parte de la señal resultante debe su origen a las características iniciales del tsunami (controladas por las características del sismo que le genera), y qué parte queda controlada por la batimetría. En este trabajo se presentan los resultados de un análisis orientado a identificar claramente esta discriminación.

En primer lugar se explora el método propuesto por Rabinovich (1997), y empleado por (Rabinovich et al., 2006; Vich and Monserrat, 2009; Abe, 2011). Este consiste en definir un espectro sin eventos de tsunami, llamado “espectro de fondo”, el cual permite identificar algunas de las oscilaciones de onda larga propias de la zona en estudio. De esta manera, se asume que este espectro de fondo describe las componentes que quedan dominadas por la configuración geomorfológica, especialmente la batimetría de la plataforma continental.

El espectro de fondo es posteriormente contrastado con el espectro para un evento particular, con miras a identificar si dichos modos locales han sido exacerbados. Además se calcula la razón entre el espectro de tsunami y el de fondo, a partir de la cual es posible recuperar la información respecto de las características de la fuente.

Se aplicó la metodología al tsunami de Tohoku de 2011, correspondiente a un evento de campo lejano para los mareógrafos estudiados en Iquique y Arica. Los resultados obtenidos muestran tanto características compartidas entre ambos sectores, como algunas diferenciadoras y que guardan estrecha relación con la batimetría de cada zona, lo que satisface el objetivo fundamental de establecer los períodos resonantes para cada localidad y cuantificar su influencia en la respuesta frente a un fenómeno de campo lejano.

2. BREVE MARCO TEÓRICO*

La medición fundamental sobre la que se realiza el análisis la constituye la desnivelación de la superficie libre, respecto de su nivel de referencia. En particular, se descartan del análisis aquellas debidas a la marea astronómica. De esta forma, se asume que la condición de anomalía será descrita por

$$\zeta_{obs}(t) = \zeta_{tsun}(t) + \zeta_{Back}(t) + \varepsilon(t) + M(t) \quad (1)$$

* El desarrollo teórico esta tomado íntegramente de Rabinovich (1997).

representando las señales de tsunami, fondo, ruido instrumental y meteorológica, respectivamente. Respecto de ésta última, se asume que ésta no es una señal que presente una periodicidad característica, por lo que puede ser incorporada para efectos de análisis al ruido instrumental. Cerca de la costa las oscilaciones de tsunami pueden ser representadas como la convolución de una función de respuesta con la función de fuente,

$$\zeta_{tsun}(t) = \int_0^{\infty} w(\tau) E_{tsun}(\tau) d\tau \quad (2)$$

O en el dominio de frecuencias

$$S_{tsun}(\omega) = W_{tsun}(\omega) Z(\omega) \quad (3)$$

Donde ω es la frecuencia angular, $Z(\omega)$ es el espectro del tsunami en la zona de origen, y $W(\omega)$ es la función de admitancia. Esta última puede descomponerse como

$$W_{tsun}(\omega) = Y_{tsun}(\omega) Q_{tsun}(\omega) P_{tsun}(\omega) \quad (4)$$

Cada uno de los términos a la derecha representa las funciones de admitancia para aguas profundas, plataforma continental y bahías, respectivamente.

En forma análoga, se puede definir el espectro de fondo como

$$S_{Back}(\omega) = S_0(\omega) Q_{Back}(\omega) P_{Back}(\omega) \quad (5)$$

Con los términos a la derecha representando el espectro en aguas profundas, y las funciones de admitancia de la plataforma y la bahía, respectivamente.

Rabinovich (1997) establece que $S_0(\omega)$ es universal y no posee picos definidos, por lo que los picos en $S_{Back}(\omega)$ provienen de las funciones de admitancia. Además establece que los picos de eventos de tsunami, analizados en estudios previos, corresponden en general a picos en los espectros de fondo, lo que permite tomar como hipótesis

$$Q_{Back}(\omega) = Q_{Tsun}(\omega) \quad P_{Back}(\omega) = P_{Tsun}(\omega) \quad (6)$$

Es decir, que tanto el tsunami como cualquier otra onda serán modificados en forma análoga por la plataforma o bahía, respectivamente.

Por otra parte, se establece que la admitancia del tsunami en aguas profundas $Y_{tsun}(\omega)$, está asociada principalmente al fenómeno de dispersión lineal. Ello implica que si el espectro de fondo considerado es medianamente cercano a la fuente, $Y_{tsun}(\omega) = constante$, lo que permite establecer

$$\alpha \frac{S_{Tsun}(\omega)}{S_{Back}(\omega)} = \frac{Z(\omega)}{S_0(\omega)} \quad (7)$$

Con α , constante de proporcionalidad empírica. Por otra parte, al desconocerse a priori el espectro de tsunamis, $S_{Tsun}(\omega)$, se puede definir el espectro observado como

$$S_z(\omega) = S_{Tsun}(\omega) + S_{Back}(\omega) + S_\varepsilon(\omega) \quad (8)$$

Y provisto que

$$S_{Back}(\omega) \gg S_\varepsilon(\omega) \quad (9)$$

Es posible reescribir

$$Z(\omega) = \alpha \left(\frac{S_z(\omega)}{S_{Back}(\omega)} - 1 \right) S_0(\omega) \quad (10)$$

Finalmente, el espectro en aguas profundas posee una descripción conocida, la cual al ser reemplazada en la ecuación anterior da

$$Z(\omega) = \alpha \left(\frac{S_z(\omega)}{S_{Back}(\omega)} - 1 \right) E_0 \frac{1}{2\pi} \omega^{-2} \quad (11)$$

El coeficiente αE_0 , puede ser calibrado en términos de la energía inicial del tsunami. Luego, la principal suposición es que el radio espectral definido como

$$R_{zB}^j = \frac{S_z^j(\omega)}{S_{Back}^j(\omega)} \quad (12)$$

(con j = número de estación analizada), refleja las características invariantes de la fuente, es decir, debiese presentar un comportamiento muy similar para todas las estaciones.

Los picos encontrados en el espectro de tsunami ($S_z^j(\omega)$) corresponden a las frecuencias más relevantes presentes en la señal. Dentro de estos picos, algunos podrán corresponder a períodos asociados a la resonancia y otros estarán asociados a características propias del tsunami.

Por otra parte, los picos presentes en $S_{Back}^j(\omega)$ corresponden a los períodos resonantes para cada localidad estudiada.

Debido a lo anterior, al tomar R_{zB}^j es de esperarse que la amplitud espectral de los picos asociados a resonancia presentes en el espectro $S_z^j(\omega)$ disminuya. Al mismo tiempo, otras frecuencias se verán amplificadas, transformándose en picos para R_{zB}^j . El análisis considera que si los períodos asociados a dichos picos difieren de aquellos correspondientes a picos resonantes encontrados previamente, estos corresponderían a períodos propios de la fuente.

3. SELECCIÓN DE DATOS

Para la construcción de los espectros de fondo se obtuvieron datos de mareas en los mareógrafos de Arica e Iquique desde Mayo 2014 hasta Mayo 2015. La información obtenida de los mareógrafos fue filtrada para abstraer las componentes de marea astronómica mediante el programa UTIDE, dejando solo residuos que corresponderían a las oscilaciones de fondo, ruido instrumental y marea meteorológica. Sin embargo, se asume

que el ruido instrumental es una señal de ruido blanco y que la señal de marea meteorológica no es ergódica. Luego, esta señal no contaminará el espectro si se realiza un proceso de promediado sobre los datos. Este enfoque también permite obtener intervalos de confianza que permitan identificar con precisión los picos del espectro de fondo. Se definen eventos, los que corresponden a datos sucesivos dentro de una ventana de 27 horas. Para descartar posibles sucesos extremos que produjesen amplitudes que no correspondiesen a oscilaciones de fondo, un filtro adicional de variabilidad se le aplicó a los datos, previo a su procesamiento. Con las consideraciones anteriores, se obtuvieron 35 eventos para Arica, y 94 para Iquique.

Luego se calculó el espectro de cada evento mediante la transformada rápida de Fourier, (FFT), aplicando además un filtro de Hanning de 3 grados de libertad para suavizar el espectro. Luego, los espectros de cada evento se promediaron entre sí, asumiendo que la oscilación de fondo corresponde a un proceso estocástico y estacionario. Así, el procedimiento permite acotar el intervalo de confianza para los resultados y elimina señales espurias.

En el caso de las señales de tsunami se procedió en forma análoga. Tomando una ventana de 27 horas de duración desde el inicio del tsunami identificado en forma visual, se procede a calcular su espectro mediante FFT y se aplica el filtro Hanning. Ello se hace tanto para los mareógrafos en Iquique y Arica, como para aquellas boyas DART que se encuentran en la trayectoria del tsunami. En este caso se utilizaron cinco boyas en distintas ubicaciones a lo largo de la dirección principal de propagación transoceánica del evento de Tohoku, 2011, según se aprecia en la Figura 1.

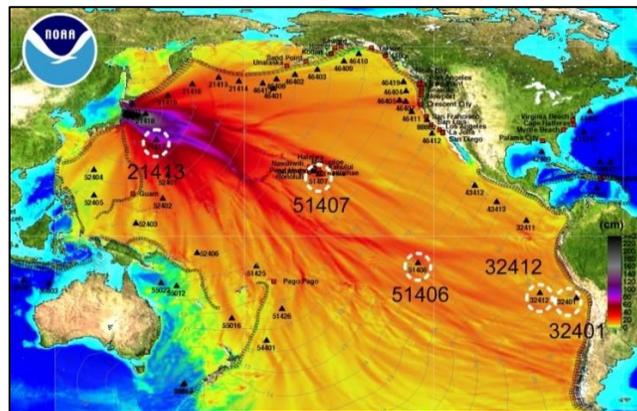


Figura 1. Mapa de alturas máximas par el tsunami de Tohoku 2011, (adaptado de NOAA). Se indican los mareógrafos DART a ser incluidos en el análisis espectral.

4. RESULTADOS

Espectros de Fondo - $S_{Back}^j(\omega)$

En la Figura 2 se presentan los resultados para Arica e Iquique, respectivamente. La línea roja representa el espectro medio, y las líneas grises los espectros individuales (35 en Arica y 94 en Iquique). Como se puede apreciar, pese a la variabilidad en energía, los espectros individuales representan de manera razonable la tendencia descrita por el espectro medio.

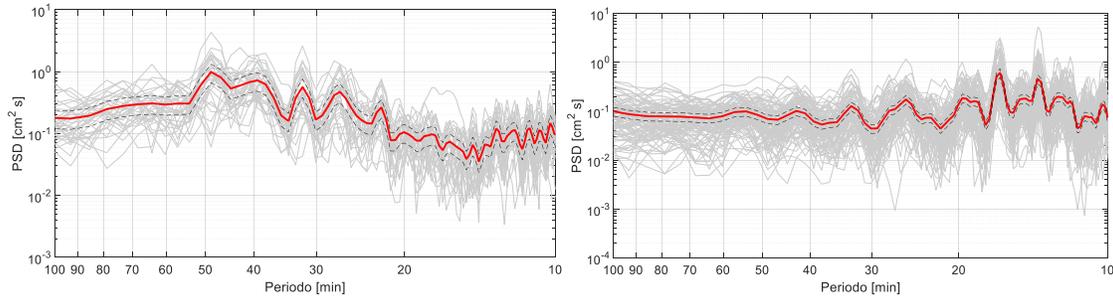


Figura 2. En rojo: Espectros medios de fondo para Arica ($S_{Back}^1(\omega)$), e Iquique ($S_{Back}^2(\omega)$), respectivamente. Las líneas segmentadas representan los intervalos de confianza, y las en color gris los espectros individuales para cada evento.

Esto permite identificar picos de oscilación definidos para cada una de las dos localidades. Arica concentra su energía principalmente en la banda de períodos entre 55-20 minutos, (min), mientras que Iquique lo hace en la banda 25-10 min. Existen picos de energía compartidos para ambos espectros, específicamente en 32 y 27 min. En la Tabla 1, se muestran los valores para los picos de cada imagen.

Tabla 1. Períodos pico para cada uno de los espectros de fondo.

	Período (Min)									
Arica	48.8	-	39.4	32	27	22.3	-	-	-	-
Iquique	-	42.7	-	33	25.6	-	19.7	16.5	13.8	12.6

Señales de Tsunami en Campo Lejano y Cercano - $S_z^j(\omega)$

Debido a la propagación transoceánica y al mecanismo propuesto como origen para el tsunami (Grilli et al 2012), el evento de Tohoku 2011 se caracteriza por contar con una componente dispersiva en su propagación. Esto significa que las olas de mayor período se propagan más rápido que las de períodos menores.

El mareógrafo 21413 cercano a Japón (en azul en la Figura 3), tiene un contenido energético elevado, con un nivel medio relativamente constante para los períodos entre 90 y 20 min. Por otra parte, los mareógrafos 51406 y 51407 ubicados en la cuenca del Pacífico (en color verde), presentan una concentración de energía en períodos altos con una abrupta caída energética para períodos menores a 35 min, evidenciado la componente dispersiva.

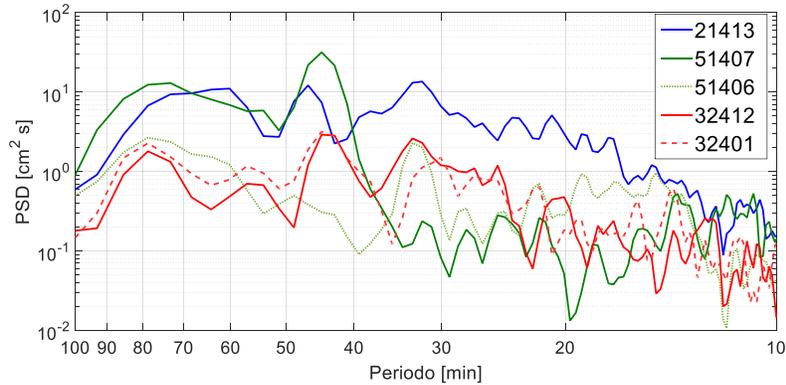


Figura 3. Espectro de las boyas DART, 21413 Japón-Fuente, 51407 y 51406 Pacífico Central, 32412 y 32401, Chile.

Las boyas en la cercanía de la costa chilena (en rojo en la Figura 3), presentan un comportamiento muy similar, donde los picos principales son coincidentes el rango 90 - 23 min, bajo el cual existen algunas diferencias. No obstante, la energía en este rango de frecuencias es menor que en los otros mareógrafos ilustrados.

Al comparar los resultados de las señales aguas afuera de Chile con los mareógrafos en Arica e Iquique, la redistribución energética se hace evidente. De la Figura 4 se desprende que en primera instancia hay un aumento general de la energía, lo que es consistente con el proceso de asomeramiento.

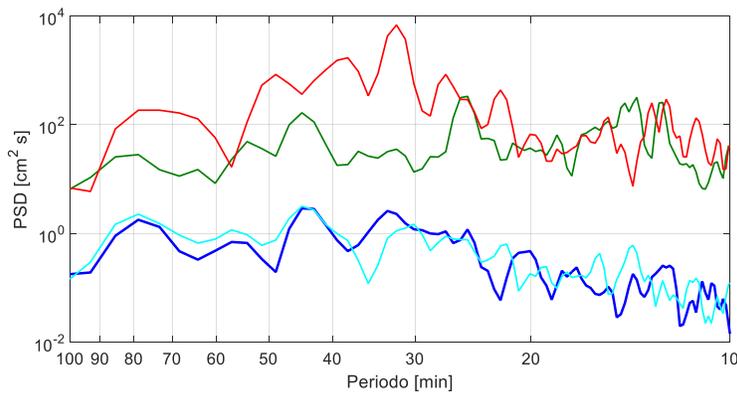


Figura 4. Espectros de las boyas 32412 (azul), y 32401, (cyan), comparado con los espectros de la señal de tsunami para Arica, (rojo), e Iquique, (verde).

Arica ($S_{\frac{1}{2}}^1(\omega)$) presenta un primer pico cercano a los 79 min con un gran ancho de banda, el que tiene un homólogo en los registros DART. Luego existe una zona energética entre 55 y 20 min, que contiene todos los picos principales. Picos secundarios se identifican en el rango 20 – 10 min. Esta distribución es muy similar a la observada para el espectro de fondo de la misma localidad (Figura 2 a la izquierda).

El espectro de Iquique ($S_z^2(\omega)$) presenta un comportamiento opuesto al de las boyas DART, pues hay un aumento de la amplitud espectral media a medida que disminuye el período. A diferencia de Arica, los picos principales se encuentran espaciados en el rango 100 – 10 minutos. Por otra parte, la forma del espectro del registro se asemeja a la del espectro de fondo (Figura 2 a la derecha).

Tabla 2. Períodos pico para espectro de las señales de terremoto ($S_z^j(\omega)$). En negrita aquellos picos que se encuentran presentes en los espectros de fondo ($S_{Back}^j(\omega)$).

	Períodos (min)														
Arica	78.8	-	48.8	-	37.9	32.0	27.0	22.3	20.1	-	15.3	-	-	13.1	12.5
Iquique	78.8	53.9	-	44.5	-	32.0	25.0	-	-	18.3	-	14.4	13.8	-	12.6

Resonancia Local ($S_z^j(\omega)$ Versus $S_{Back}^j(\omega)$)

La comparación de los espectros $S_z^1(\omega)$ y $S_z^2(\omega)$ con los ya calculados $S_{Back}^1(\omega)$ y $S_{Back}^2(\omega)$ permite establecer picos repetidos que corresponderían a oscilaciones de fondo exacerbadas por la energía proveniente del Tsunami. En la Tabla 2 se aprecia que la mayor parte de los picos en los registros de tsunami, corresponden a períodos pico de los espectros de fondo, confirmando la presencia de resonancia.

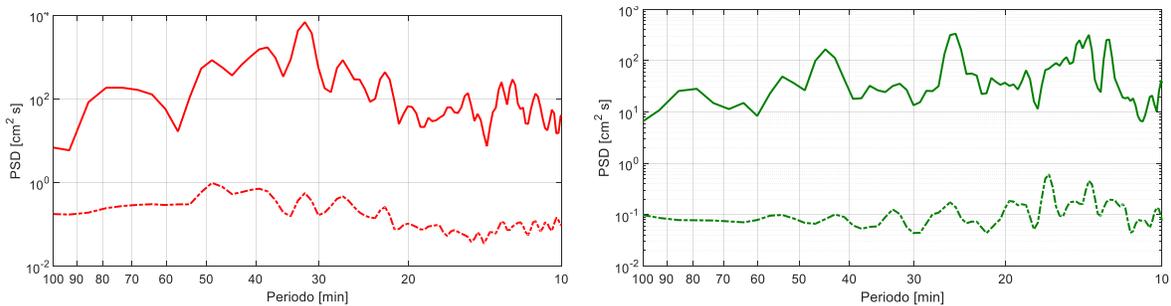


Figura 5. Espectros de señal de tsunami (línea continua), y de fondo (línea segmentada), para Arica (izquierda), e Iquique (derecha).

De la Figura 5 se desprende que las formas de los espectros $S_z^j(\omega)$ son similares a los de los $S_{Back}^j(\omega)$ para cada localidad, como se mencionó anteriormente. Este aspecto resulta interesante puesto que se mantiene a groso modo el orden de importancia de los períodos definido por los espectros de fondo.

5. DISCUSION

Modos Propios del Tsunami

La identificación de los modos del tsunami se realiza mediante el análisis de los picos presentes R_{zB}^j . Aquellos picos de energía que aparezcan en estas razones, y no se encuentren en el espectro de fondo, corresponderían a información contenida en la señal original o “fuente”. Lo anterior ya que los picos correspondientes al espectro de fondo deberían atenuarse al realizar la división.

Debido a que el espectro de la fuente se desconoce, se propone como alternativa analizar los picos presentes en las señales DART ya mencionadas (Japón, Pacífico Central y Chile). Es de esperar que si un pico energético se puede encontrar en todas ellas este no estaría influenciado por la propagación del tsunami (accidentes topográficos – batimétricos encontrados en la trayectoria), lo que implicaría que su origen estaría dado por la fuente.

En palabras simples, este análisis considera que los picos repetidos en los mareógrafos DART corresponden a picos del espectro fuente $Z(\omega)$. Como $Z(\omega)$ proporcional a R_{zB}^j los períodos correspondientes a picos energéticos deberían ser idénticos para ambos. Por tanto los picos de R_{zB}^j quedan “validados” si ellos corresponden a los picos repetidos entre las boyas DART.

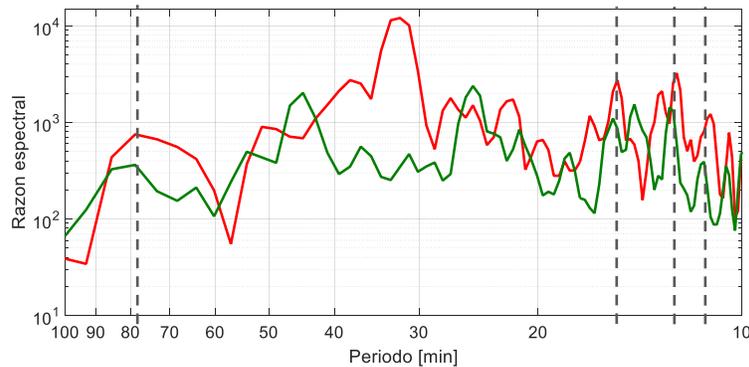


Figura 6. Razones espectrales comparadas, Arica, (rojo), e Iquique, (verde). Las líneas Verticales segmentadas indican zonas comunes de concentración de energía.

En primer lugar se comparan las razones espectrales R_{zB}^j , destacándose sólo aquellos picos comunes que no correspondan a períodos presentes en los espectros de fondo. La Figura 6 ilustra este análisis, mientras que en la Tabla 3 se detallan los valores de los períodos para cada pico. Es posible apreciar que encontraron cuatro períodos comunes a pesar de que las estaciones están aproximadamente a 190 km de distancia.

Tabla 3. Períodos pico para las razones espectrales (R_{zB}^j) de Arica e Iquique

	Períodos picos para R (min)						
Arica	78.8	16.8	15.3	-	13.13	12.49	11.4
Iquique	78.8	-	15.5	14.4	-	12.8	11.4

Bajo los supuestos establecidos, resulta necesario comparar estos valores repetidos con los picos energéticos de las cinco boyas DART consideradas en el análisis. En la Figura 7, se aprecian los espectros de las boyas DART, sobre las cuales se ha trazado con línea segmentada los cuatro períodos repetidos para las razones R_{zB}^j . Se indica además con puntos negros, las boyas DART donde dichos períodos también corresponden a un pico. En el caso de las boyas Chilenas en color rojo en la Figura 7, es posible recuperar los cuatro picos presentes en las razones espectrales R_{zB}^j , lo que no se da en las otras boyas DART.

Es muy probable que lo anterior se deba a que una de las consideraciones del método de (Rabinovich, 1997) indica que la función $Y_{tsun}(\omega)$ está asociada a la dispersión de olas, y que por tanto es relativamente constante cuando la fuente es cercana a los mareógrafos analizados. Resulta claro que para la trayectoria entre las boyas DART Chilenas y los mareógrafos de Arica e Iquique, la condición se satisface, mientras que para el recorrido entre las DART ubicadas en Japón y la cuenca del Pacífico, y los mareógrafos en la costa Chilena, la función $Y_{tsun}(\omega)$ probablemente sea variable.

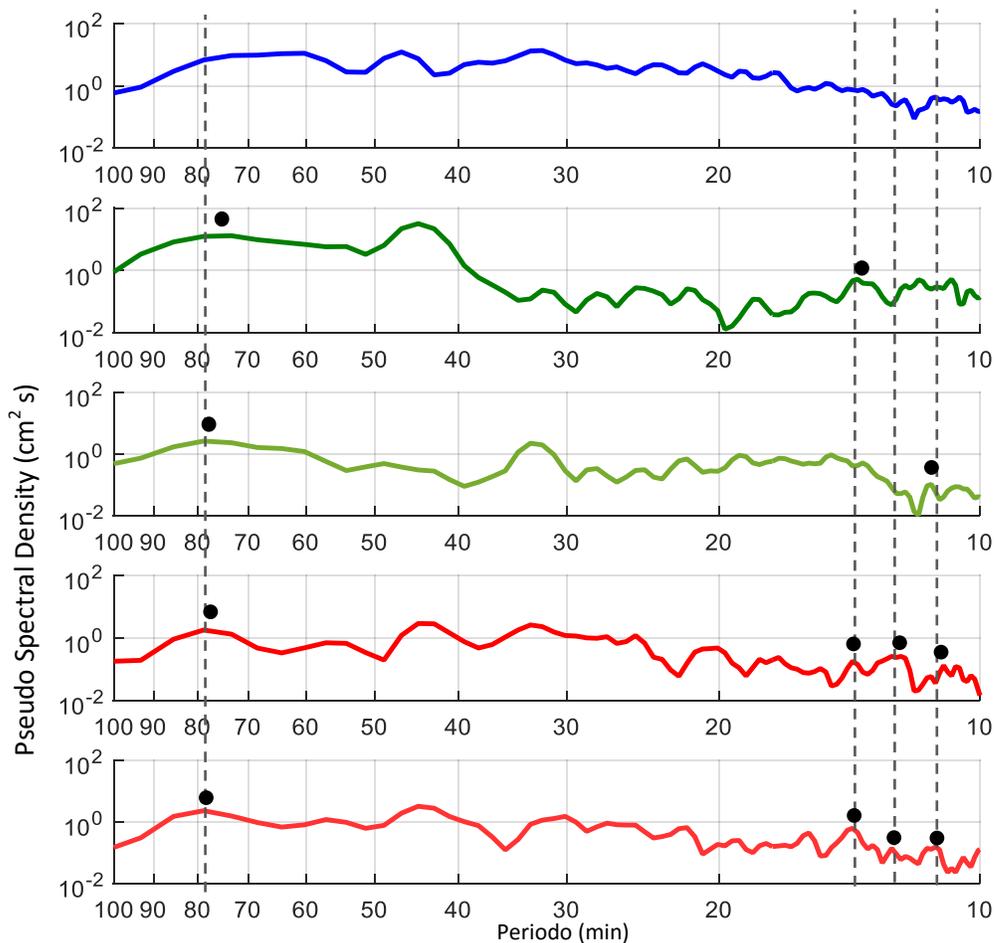


Figura 7. Espectros de boyas DART, 21413, 51407, 51402, 32412 y 32401, (de arriba abajo), las líneas verticales indican los períodos pico comunes encontrados en las razones. Los puntos indican las señales donde están presentes.

A pesar de la posible variación en la función $Y_{tsun}(\omega)$, se asumió que si un período pico para los R_{zB}^j estaba repetido las cinco señales de mareógrafo este correspondería efectivamente a un período pico contenido en la fuente. De dicho análisis se desprende que el período correspondiente a 79 minutos sólo está ausente en la estación DART aguas afuera de Japón. El pico correspondiente a este período se va definiendo más a medida que las boyas se alejan de dicha estación. Ello puede relacionarse con el fenómeno de dispersión del oleaje ya descrito. Considerando que en cuatro de las cinco boyas el período está presente se sugiere que éste forma parte de los picos del espectro teórico de la fuente $Z(\omega)$.

Influencia Batimétrica.

Las diferencias de comportamiento de Arica e Iquique se explican debido a sus diferencias topo-batimétricas. En un primer análisis, considerando solo efectos en una dimensión, se inspeccionan de los perfiles batimétricos de la zona (Figura 8). Lo anterior permite establecer que Arica posee una plataforma continental extendida y con una baja pendiente, mientras que en Iquique ésta posee una menor extensión y una pendiente más pronunciada.

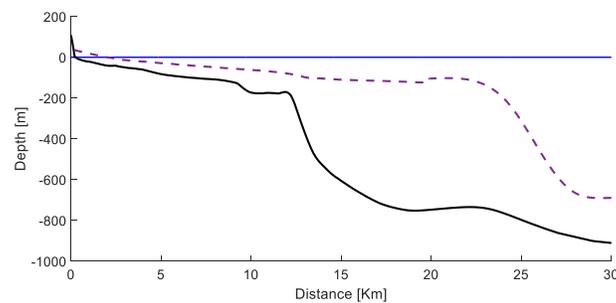


Figura 8. Perfiles de fondo para Arica, (segmentado), e Iquique, (continuo). La línea azul indica el nivel cero.

Los análisis espectrales previos de (Yamazaki et al., 2011) y (Catalán et al., 2015) realizados en dominios extendidos, muestran que en general las oscilaciones resonantes quedan confinadas hasta los 200 metros de profundidad. De la Figura 8, se desprende precisamente que, en forma aproximada, es aquí donde la pendiente sufre un cambio súbito.

Tabla 4. Características de los perfiles de fondo.

	Iquique	Arica
Largo(km)	11.7	21.2
Pendiente (m/km)	14.4	6.9
Profundidad media (m)	84.4	72.8

(Rabinovich , 2009) recopila los principales resultados teóricos para resonancia en bahías. En su análisis, se entregan fórmulas aproximadas que permiten evaluar en forma rápida el valor del período fundamental con expresiones genéricas del tipo

$$T \approx k \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (13)$$

Con T : período, L : largo característico, g : gravedad, h : profundidad media y k es una constante que depende de las condiciones de borde, forma de la bahía y perfil de fondo. Reemplazando los valores de la Tabla 4 en la expresión anterior, (k no es reemplazado), encontramos que Arica da $13.21 k$, mientras que en Iquique se obtiene $6.78 k$, es decir, los períodos debiesen estar en una proporción aproximada de 2:1. Revisando los principales períodos de fondo de Arica (48.8, 38 y 32) y comparándolos con el período de fondo fundamental de Iquique (16.5 min) se obtienen razones de 2.95, 2.38 y 2, sustentando éste análisis. Lo anterior indica que Iquique no posee el suficiente espacio ni profundidad para desarrollar modos de período alto, mientras que el cambio repentino de dirección de la línea de costa entre el norte de Chile y Perú produce una zona de ensanchamiento de la plataforma continental frente a Arica, permitiendo la existencia de modos de más alto período.

Es posible obtener valores numéricos tomando un estimativo aún más crudo para las expresiones de (Rabinovich, 2009) que consideran la forma en planta. Para ello, se asumió que ambas bahías son de tipo semi-circular, ajustándoseles círculos en forma visual como se aprecia en la Figura 9.

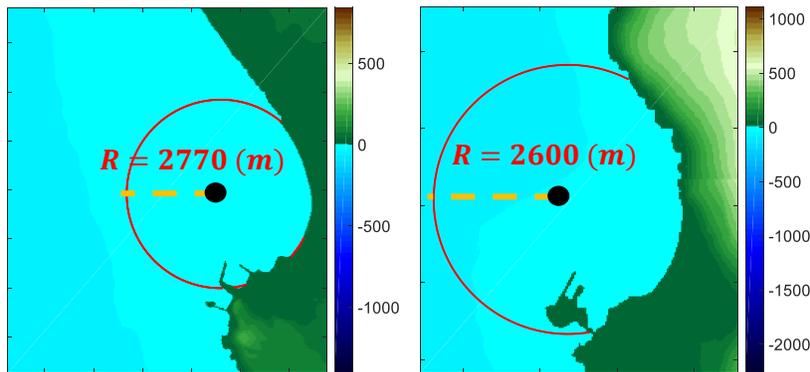
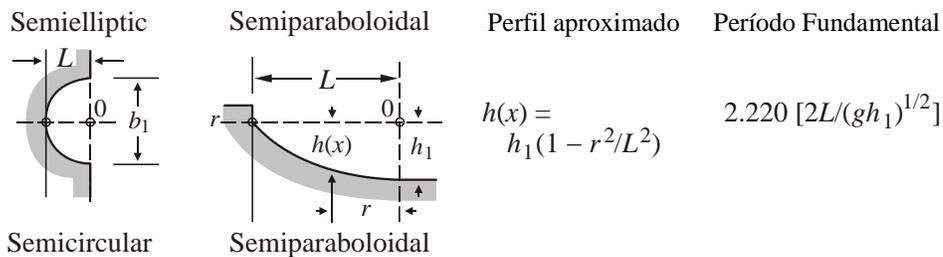


Figura 9. Arriba: Caso considerado, (Rabinovich 2009). Abajo: Dominios semi-circulares aproximados para evaluación de expresiones. Escalas horizontales entre figuras difieren, escala vertical en metros.

Las profundidades de borde son de 17 y 51 metros para Arica e Iquique, respectivamente, lo que da como resultado un período fundamental de 37 minutos para Arica y 12 minutos para Iquique. A pesar del crudo estimativo, los valores son muy cercanos a los observados en los espectros de fondo, sustentando dicho análisis.

6. CONCLUSIONES

El método de espectros de fondo y razones espectrales aplicado a los mareógrafos de Arica e Iquique ha permitido concluir que existen modos resonantes, los cuales han sido además cuantificados. La inclusión de espectros de señales provenientes del Tsunami producido por el terremoto de Tohoku de 2011 ha permitido además corroborar que dichos modos juegan un rol fundamental en la transformación energética para las características de tsunami en aguas profundas, una vez que éste se encuentra con la batimetría costera. Es posible establecer como hipótesis que, independiente del forzante, la plataforma a través de sus características topo-batimétricas, actúa como un filtro al escoger sus modos propios como aquellos en los que oscilará la superficie del mar. Además, los períodos de la señal coincidentes con períodos de fondo se verán notoriamente exacerbados. Probablemente el pico que representa de mejor forma la conclusión anterior es el correspondiente a 32 min, observado en todos los espectros aquí mostrados.

Resulta también notable que el período de fondo 27 min es coincidente con uno de los propuestos en el análisis de (Catalán et al., 2015), promoviendo la idea de la plataforma como filtro, independiente del forzante. Se requiere trabajo adicional para otros eventos con esta metodología (como Arauco 2010 y Pisagua 2014) para sustentar la hipótesis propuesta.

AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera agradecer a CONICYT por el financiamiento de los estudios de postgrado mediante CONICYT-PCHA/Magíster Nacional/2013 (221320628) – Folio 22130754, por el financiamiento a través del FONDEF D11I1119; y por el apoyo en la revisión y discusión del presente trabajo a CONICYT a través de FONDAP 15110017, (CIGIDEN).

REFERENCIAS

Abe, K., (2011), Synthesis of a Tsunami Spectrum in a Semi-Enclosed Basin Using Its Background Spectrum Pure and Applied Geophysics, SP Birkhuser Verlag Basel, 168, 1101-1112

Catalán, P. A.; Aránguiz, R.; González, G.; Tomita, T.; Cienfuegos, R.; González, J.; Shrivastava, M. N.; Kumagai, K.; Mokrani, C.; Cortés, P. & Gubler, A. (2015), The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling, *Geophysical Research Letters*, 42, 2918-2925

Henry, R. & Murty, T. Tsuchiya, Y. & Shuto, N. (Eds.), (1995), Tsunami Amplification Due to Resonance in Albani Inlet: Normal Modes Tsunami: Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning, Springer Netherlands, 4, 117-128

Kowalik, Z.; Horrillo, J.; Knight, W. & Logan, T. , (2008), Kuril Islands tsunami of November 2006: 1. Impact at Crescent City by distant scattering Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union, 113, C01020

Munger, S. & Cheung, K., (2008), Resonance in Hawaii waters from the 2006 Kuril Islands tsunami Geophysical Research Letters, American Geophysical Union, 35, L07605

Rabinovich, A. B., (1997), Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102, 12663-12676

Rabinovich, A. B., (2009), Seiches and Harbour Oscillations, Capítulo 9 en: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, World Scientific.

Rabinovich, A.; Stephenson, F. & Thomson, R., (2006), The California Tsunami of 15 June 2005 along the coast of North America Atmosphere-ocean, CMOS, 44, 415-427

Roeber, V.; Yamazaki, Y. & Cheung, K. , (2010), Resonance and impact of the 2009 Samoa tsunami around Tutuila, American Samoa Geophysical Research Letters, American Geophysical Union, 37, L21604

Tolkova, E. & Power, (2011), W. Obtaining natural oscillatory modes of bays and harbors via Empirical Orthogonal Function analysis of tsunami wave fields Ocean Dynamics, Springer-Verlag, 61, 731-751

Vich, M.-d.-M. & Monserrat, S. , (2009), Source spectrum for the Algerian tsunami of 21 May 2003 estimated from coastal tide gauge data Geophysical Research Letters, 36, n/a-n/a

Yamazaki, Y., Volker, R., Cheung, K. F., and Lay, T. (2011b). Modeling the 2011 Tohoku-oki Tsunami and its Impacts on Hawaii. In Proceedings of OCEANS 2011. Waikoloa, HI, USA. 9 pp.