SIOP 2026 | COQUIMBO
XI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

ESTUDIO DE ONDAS LARGAS EN LA BAHÍA DE QUINTERO. DESDE LA MEDICIÓN HASTA LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

JORDY GONZÁLEZ GARRIDO[1,2], MATÍAS QUEZADA LABRA[1,3] & EDUARDO COSIO TOLEDO[4]

RESUMEN

La Bahía de Quintero, ubicada en la zona central de Chile, corresponde a un sistema costero de alta relevancia industrial y portuaria, donde históricamente se han registrado problemas operacionales asociados a la agitación y al movimiento excesivo de embarcaciones, fenómeno que, según la literatura, puede estar relacionado con la presencia de ondas largas. En este trabajo se utilizan registros de cuatro perfiladores acústicos Doppler (ADCP) para caracterizar instrumentalmente estas oscilaciones mediante espectros cruzados, complementando el análisis con modelación numérica en MIKE 21 Boussinesq Wave forzada mediante un espectro de ruido blanco.

El análisis instrumental identificó componentes de infragravedad entre 30 y 55 s, además de oscilaciones de 256 y 512 s recuperadas mediante arreglos espaciales. El modelo, forzado con un espectro de ruido blanco, identificó doce máximos naturales entre 33,44 y 512,48 s. Nueve de las doce comparaciones entre periodos modelados y observados presentaron diferencias inferiores o iguales al 5 %, destacando las coincidencias en torno a 51, 64 y 512 s. Los resultados indican que parte de las oscilaciones observadas es compatible con modos naturales controlados por la geometría y batimetría de la bahía. Los resultados permiten concluir que la geometría y configuración morfológica de la Bahía de Quintero favorecen la amplificación de ondas largas, generando condiciones potenciales de resonancia que podrían afectar la operación y seguridad portuaria.

Palabras clave: onda larga, resonancia portuaria, Boussinesq, Bahía de Quintero, MIKE 21.

---

[1]Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.
[2]Ingeniero de Proyectos, SGS-Ecotecnos, jordy.gonzalez@sgs.com
[3]Gerente Técnico, IngeOceano SpA, matias.quezada@ingeoceanospa.cl
[4]Gerente de Proyectos, IngeOceano SpA, eduardo.cosio@ingeoceanospa.cl

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

La Bahía de Quintero, situada en la Región de Valparaíso, Chile, presenta una intensa actividad industrial y portuaria, albergando refinerías, plantas termoeléctricas, plantas desaladoras, entre otros usos. Este contexto ha contribuido a que Quintero sea denominada una "zona de sacrificio" desde un punto de vista ambiental, donde los impactos y riesgos para la salud de las personas han adquirido especial relevancia.

La Figura 1 presenta la zona de trabajo en tres niveles de escala: el mapa general ubica la Región de Valparaíso en Chile continental, el Mapa A muestra la Bahía de Quintero con el recuadro de la zona de interés, y el Mapa B detalla el sector norte de la bahía, donde se fondearon los cuatro ADCP (A01 a A04) cuyas coordenadas y profundidades se consignan en la tabla de la misma figura.

En años recientes, distintos incidentes han puesto en evidencia la peligrosidad asociada a las condiciones dinámicas del mar en esta bahía. Tanto en el año 2016[1] como en el 2021[2], diversos reportes de prensa han mencionado que se han producido cortes de espías en el Puerto Ventanas. Estos eventos refuerzan la necesidad de comprender los fenómenos físicos que pueden contribuir a movimientos excesivos de embarcaciones y afectar la seguridad portuaria.

Los movimientos de baja frecuencia de buques amarrados y los esfuerzos sobre los sistemas de amarre pueden estar asociados a la presencia de ondas largas (Sakakibara & Kubo, 2008; Uzaki et al., 2010; Dong et al., 2022). En este contexto, el presente estudio integra antecedentes de campo y modelación numérica con el objetivo de analizar la presencia de ondas largas y su eventual resonancia en la Bahía de Quintero, dado que estos fenómenos pueden amplificar la agitación del cuerpo de agua y afectar tanto las estructuras como las operaciones portuarias.

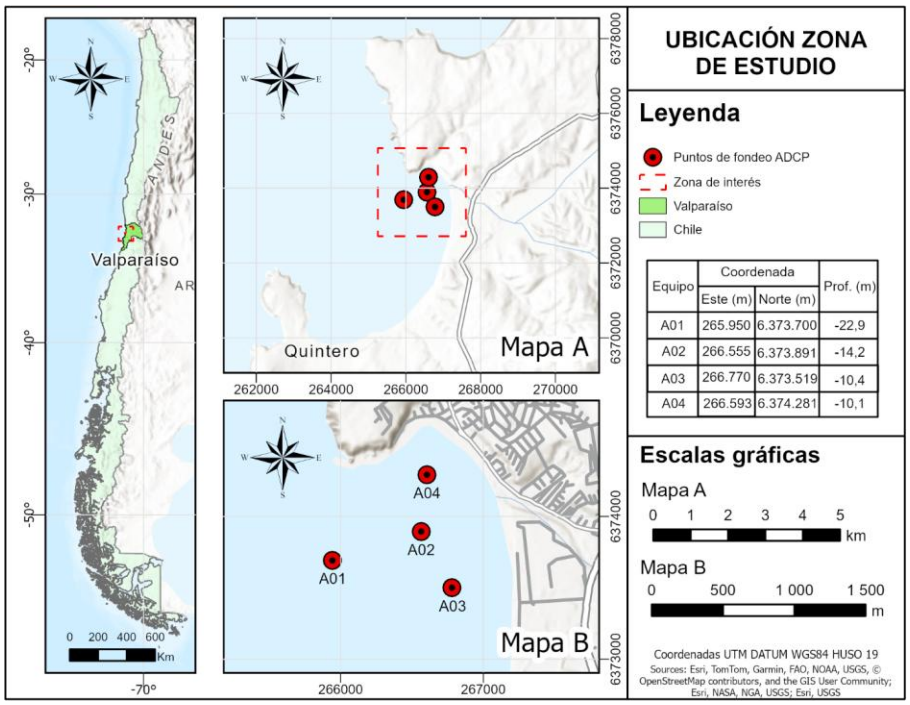
1.2 Breve revisión del estado del arte

Las oscilaciones de largo periodo constituyen un fenómeno de relevancia para la dinámica costera y la operatividad portuaria, debido a que pueden generar importantes amplificaciones de la superficie libre cuando las frecuencias del forzamiento se aproximan a las frecuencias naturales de una bahía o dársena. La respuesta resonante depende fundamentalmente de la geometría, profundidad y configuración de la bahía o puerto, así como de las características espectrales y del mecanismo de forzamiento incidente. En consecuencia, la identificación de los periodos naturales constituye un aspecto fundamental para evaluar la respuesta hidrodinámica del cuerpo de agua y, particularmente en el caso de infraestructura portuaria, para anticipar condiciones potencialmente desfavorables para las operaciones.

[1] *https://www.mundomaritimo.cl/noticias/tres-trabajadores-resultaron-lesionados-cuando-realizaban-maniobras-en-puerto-de-ventanas*

[2] *https://portalportuario.cl/corte-de-espia-provoca-muerte-de-tripulante-filipino-en-ventanas/*

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Uno de los mecanismos más importantes de generación de ondas largas corresponde a la interacción no lineal entre grupos de ondas cortas, siendo este fenómeno usualmente conocido como *surf beat, el cual* se encuentra estrechamente relacionado con la generación de oscilaciones de baja frecuencia asociadas a la modulación de grupos de oleaje. En este contexto, Longuet-Higgins y Stewart (1964) contribuyeron al desarrollo de sus fundamentos teóricos mediante el concepto de tensiones de radiación, demostrando la existencia de ondas largas forzadas asociadas a grupos de olas incidentes (según González-Marco et al. , 2008).

Estas componentes pueden propagarse asociadas a los grupos de oleaje como ondas largas ligadas (*bound long waves*), pero al aproximarse a aguas someras pueden generarse componentes libres (*free long waves*) capaces de propagarse independientemente del oleaje que las originó. Dong et al. (2013) demostraron mediante un modelo Boussinesq que la relación entre ondas ligadas y libres depende de las características del oleaje incidente y de su longitud, mientras que estudios posteriores mostraron que la amplitud de ambas componentes presenta una dependencia cuadrática respecto de la amplitud de las ondas cortas (Gao et al., 2016).

González-Marco et al. (2008), mediante modelación numérica del puerto de Gijón, demostraron que la inclusión de ondas largas puede incrementar significativamente la agitación portuaria y los periodos de inactividad operacional. Asimismo, Lepelletier & Raichlen (1987) demostraron, mediante estudios numéricos y experimentales, que la respuesta resonante puede presentar

importantes efectos no lineales (para modos superiores), generando máximos secundarios que no son reproducidos adecuadamente mediante aproximaciones lineales.

La resonancia no está asociada exclusivamente a ondas largas generadas por el oleaje. Se han identificado oscilaciones inducidas por variaciones atmosféricas de presión y viento (meteotsunamis y también Rissagas), como en la bahía de Jervis, Australia (Buchwald y De Szoeke, 1973), o en Nagasaki, Japón (Hibiya & Kajiura, 1982). Asimismo, estudios realizados en Japón y Canadá han relacionado determinadas oscilaciones de baja frecuencia con ondas de borde (*edge waves*), aunque en algunos casos no fue posible demostrar de manera concluyente el mecanismo de forzamiento (Lemon et al., 1979; Yanuma y Tsuji, 1998). Estos antecedentes muestran que la respuesta resonante debe entenderse como el resultado de la interacción entre las características naturales del cuerpo de agua y el espectro del forzamiento, más que como consecuencia de un único mecanismo generador.

La complejidad de estos procesos ha motivado el desarrollo y aplicación de diferentes aproximaciones numéricas. Los modelos basados en ecuaciones Boussinesq permiten representar explícitamente procesos dispersivos y no lineales asociados a la generación, propagación y transformación de ondas largas, mientras que las ecuaciones de pendiente suave (*Mild-Slope Equation*, MSE) constituyen una alternativa de menor costo computacional para problemas en los que resulta válida una aproximación lineal. Guerrini et al. (2014), al comparar ambas metodologías, encontraron que ambos enfoques podían proporcionar resultados razonables para aplicaciones ingenieriles, aunque con diferencias del orden de ±30 %. La aplicación de modelos Boussinesq en puertos reales como Gijón (González-Marco et al., 2008), Ngqura (Stuart et al., 2014) y Shibushi (Ota et al., 2010) ha permitido además demostrar su capacidad para reproducir la distribución espectral y la amplificación de las ondas largas, especialmente cuando los resultados son contrastados con mediciones de campo.

Una metodología particularmente útil para determinar los periodos naturales de una cuenca corresponde a la utilización de espectros de ruido blanco, aunque computacionalmente más costosa comparada con la estimación de los modos propios, permite representar de mejor manera los efectos no lineales. Esta estrategia consiste en imponer numéricamente un estado de mar sintético que contenga un amplio rango de frecuencias, permitiendo excitar simultáneamente diferentes modos resonantes. De esta manera, una única simulación puede utilizarse para identificar las bandas de frecuencia que presentan mayor amplificación. Esta metodología ha sido aplicada en diversos estudios de puertos a lo largo del mundo (Kofoed-Hansen et al., 2005; Gierlevsen et al., 2001; Stuart et al., 2014; Cosio, 2016) y fue utilizada por Rossouw et al. (2014). Nwogu (2001) también demostró, mediante un modelo Boussinesq en el dominio temporal, que la generación y amplificación de ondas largas puede reproducirse a partir de oleaje irregular espectral, incluyendo la excitación selectiva de los periodos naturales de la bahía.

La evidencia disponible demuestra que las ondas largas pueden constituir un componente determinante en la respuesta de las bahías. La geometría y batimetría controlan los modos

propios y sus patrones espaciales, mientras que las características del forzamiento determinan cuáles de estos modos son efectivamente excitados. Además, los estudios de Gao et al. (2016) y Rossouw et al. (2014) muestran que la respuesta puede involucrar múltiples modos, por lo que la caracterización de una cuenca no debería limitarse únicamente a su primer periodo natural.

A partir de estos antecedentes, la combinación de mediciones in situ y modelación numérica mediante espectros de ruido blanco, constituye una estrategia apropiada para investigar la dinámica de ondas largas en bahías naturales, siendo esta técnica la aplicada en esta investigación. Las observaciones permiten identificar las componentes de baja frecuencia efectivamente presentes en el sistema, mientras que la modelación permite determinar sus periodos naturales y patrones de amplificación bajo condiciones controladas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de la investigación se utilizó información de una campaña de campo, herramientas numéricas y la implementación de una metodología propuesta para este estudio.

2.1 Área de estudio y mediciones de campo

La zona de estudio corresponde al sector centro-norte de la Bahía de Quintero, para la cual se dispuso de dos set de información: Mediciones instrumentales de correntometría, olas y mareas; y levantamientos batimétricos.

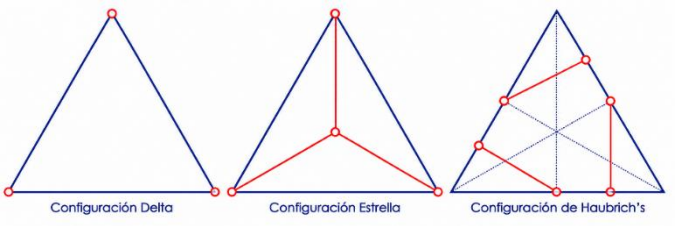
Se utilizaron registros de aproximadamente 29 días obtenidos entre el 20 de mayo y el 18 de junio de 2019 mediante cuatro ADCP Teledyne RD Instruments WHS600, cuyas posiciones y profundidades se indican en la Figura 1. Los equipos fueron programados para registrar estados de mar de 180 minutos, con intervalos de registro de 40 minutos y una frecuencia de muestreo de 2 Hz; de este modo, cada intervalo contiene 4.800 muestras. La batimetría empleada para construir el dominio numérico proviene de diversos proyectos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y de levantamientos facilitados por Ecotecnos, incluyendo la carta SHOA N°4321.

2.2 Procesamiento instrumental

El procesamiento se basó en aislar oscilaciones de baja frecuencia y evaluar su persistencia espacial y temporal. Primero se efectuó control de calidad de las series y se separó la señal asociada a la marea; posteriormente se aplicó análisis espectral con MATLAB y el toolbox WAFO (Wave Analysis for Fatigue and Oceanography). El análisis se realizó en dos escalas: por ADCP individual y mediante combinaciones entre los transductores de los cuatro equipos. Cada ADCP dispone de cuatro registros de desnivelación de la superficie; al combinar transductores equivalentes (Transductores 01 en todos los ADCP (combinación 01), transductores 02 en todos los ADCP (combinación 02) y sucesivamente) entre estaciones se construyeron cuatro arreglos representativos (ver Figura 2), configurando un arreglo tipo estrella de escala kilométrica.

Para la estimación espectral direccional se empleó la función dat2dspec con nfft = 512, discretización direccional nt = 360 y método bayesiano BDM. La estimación espectral se realizó utilizando una ventana Hanning definida sobre la longitud completa de cada registro (4800 muestras, equivalentes a 2400 s a una frecuencia de muestreo de 2 Hz); por tanto, el parámetro nfft no corresponde a la longitud temporal de la ventana de análisis.

Figura 2: Ejemplo de configuraciones óptimas para localizar medidores de oleaje.



Fuente: Adaptado de Goda (1985).

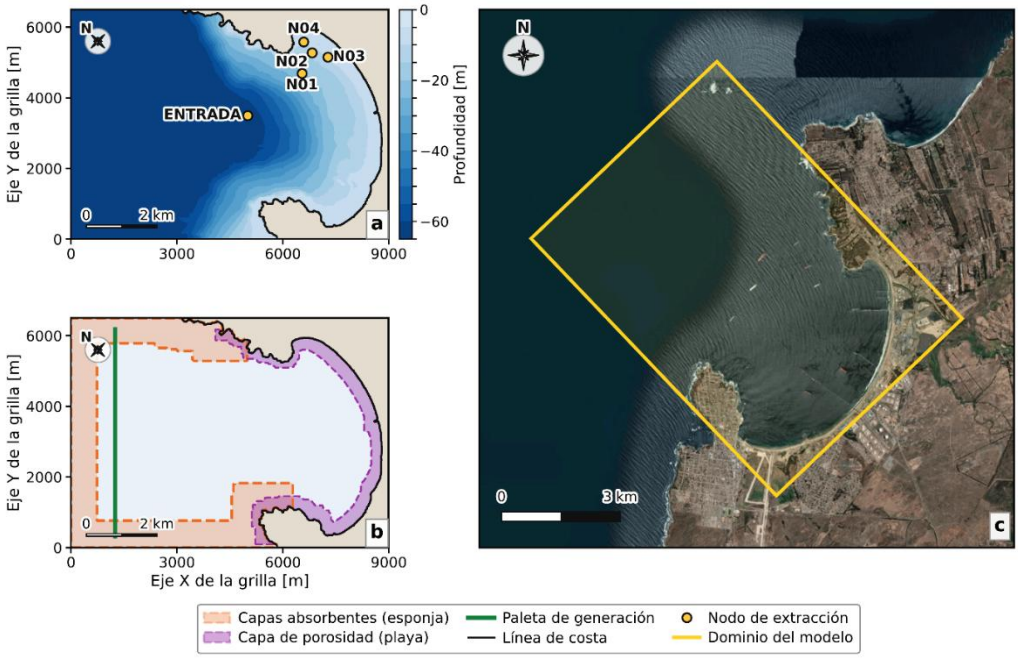
La identificación y separación de las ondas de baja frecuencia respecto del oleaje de gravedad se realizó mediante un procedimiento de discriminación espectral, a partir de los espectros de frecuencia (S(f)) obtenidos mediante la integración direccional de S(f,θ). Sobre estos se identificaron los máximos energéticos y sus frecuencias características, clasificando las componentes según sus períodos. Para ello, se consideró como oleaje de gravedad a los períodos inferiores a 30 s (f > 0,0333 Hz), como ondas de infragravedad al intervalo entre 30 y 300 s (0,00333 < f ≤ 0,0333 Hz), y como ondas de largo período a las oscilaciones superiores a 300 s. Esta clasificación permitió diferenciar las componentes de infragravedad del oleaje de gravedad sin requerir un filtrado digital pasa-banda, complementándose con el análisis de las frecuencias mareales para distinguir las oscilaciones de origen astronómico, a partir del sensor de presión.

2.3 Modelo numérico

El enfoque numérico se implementó con MIKE 21 Boussinesq Wave (BW), ls ecuaciones de continuidad y gobierno, mediante la aproximación de Boussinesq en el dominio temporal y permite representar asomeramiento, difracción, refracción, dispersión y procesos no lineales en aguas someras. Para un mayor detalle del modelo se sugiere revisar la referencia DHI (2017).

El dominio se construyó a partir de la batimetría disponible y se rotó -45° respecto del norte, de modo que el oleaje incidente del W ingrese perpendicular a la paleta de generación. La grilla rectangular posee espaciamiento de 5 m y 1.800 × 1.300 nodos; las profundidades se acotaron entre 5 y 60 m para favorecer la estabilidad y mantener las cotas de los puntos instrumentales (Figura 3). Para reducir reflexiones artificiales desde los bordes oceánicos y laterales, se incorporaron capas de esponja, mientras que en el sector de playa se aplicó una zona de porosidad de 250 m con valor 0,95 en el contorno costero.

Figura 3: Dominio batimétrico empleado en MIKE 21 BW, con resolución de 5 m.



Fuente: Elaboración propia

La estabilidad del modelo se verificó mediante una simulación previa de tres horas con espectro TMA. La simulación de resonancia se forzó posteriormente con un espectro sintético de ruido blanco con periodos entre 30 y 1.000 s (0,001–0,033 Hz), durante 180 minutos y con paso temporal de 0,1 s. La respuesta fue extraída en cuatro nodos coincidentes con las posiciones de los ADCP (N01 a N04 de la Figura 3 coincidentes con A01 a A04 de la Figura 1, respectivamente) y en un nodo adicional en la entrada del dominio (ENTRADA), a 60 m de profundidad. El modelo se planteó deliberadamente como una prueba de respuesta natural y no como reproducción de un estado de mar operacional, por lo que no se incluyeron rotura de oleaje, variación del nivel medio por marea, fricción de fondo, ni direccionalidad espectral. Estas simplificaciones maximizan la identificación de los modos propios, pero impiden interpretar las magnitudes energéticas como condiciones reales de agitación.

2.4 Criterio de comparación

Los máximos energéticos del modelo fueron comparados con las frecuencias más cercanas obtenidas de los arreglos instrumentales, mediante el error relativo absoluto del periodo (T):

$$E_T = \frac{|T_{campo} - T_{modelo}|}{T_{modelo}} \times 100\ \% \qquad (4)$$

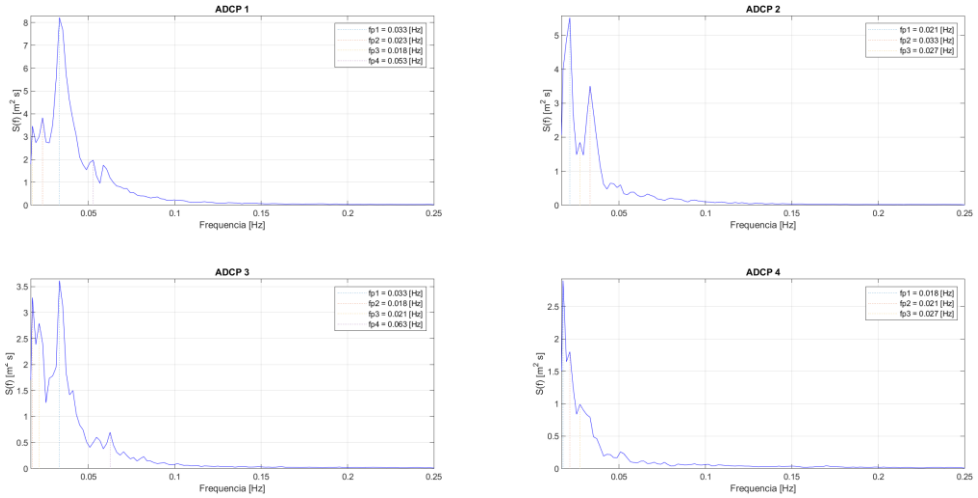
Se definieron cinco categorías de ajuste: Excelente ($E_T \leq 1\%$), Buena ($1\% < E_T \leq 3\%$), Aceptable ($3\% < E_T \leq 5\%$), Marginal ($5\% < E_T \leq 7\%$) y No coincide ($E_T > 7\%$).

3 RESULTADOS

3.1 Identificación instrumental de ondas largas

El análisis individual de cada ADCP mostró una concentración recurrente de energía entre 0,018 y 0,033 Hz, correspondiente a periodos de 30–55 s (Figura 4). Estas componentes aparecen con distinta intensidad en cada sensor y se clasifican como ondas de infragravedad, con máximos en torno a 0,018 Hz (55,6 s), 0,021 Hz (47,6 s), 0,027 Hz (37,0 s) y 0,033 Hz (30,3 s).

Figura 4: Espectros cruzados de desnivelaciones obtenidos para cada ADCP de forma individual.

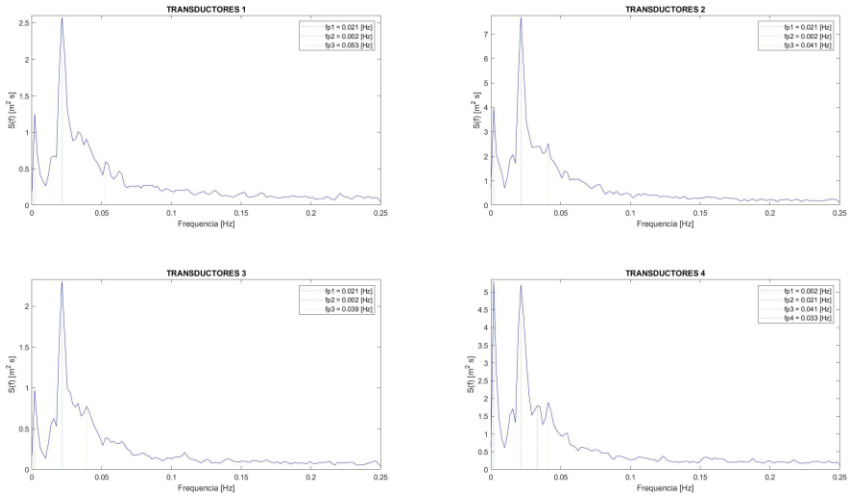


Fuente: Elaboración propia

La aparición recurrente de estas frecuencias en instrumentos espacialmente independientes constituye un resultado relevante, ya que sugiere que las oscilaciones observadas no corresponden exclusivamente a fluctuaciones locales o aleatorias de cada registro, sino que podrían representar una respuesta hidrodinámica de mayor escala presente en la Bahía. En particular, las componentes identificadas se encuentran dentro del rango característico de infragravedad, es decir, oscilaciones con periodos superiores a los del oleaje gravitacional y que pueden originarse mediante procesos de interacción no lineal entre grupos de ondas.

Debe señalarse que este procesamiento considera cada ADCP como una serie temporal independiente, por lo que permite identificar las escalas temporales dominantes presentes localmente, pero no permite establecer por sí solo relaciones de fase, dirección de propagación o mecanismos de resonancia entre estaciones. De tal modo que resulta fundamental, incorporar el análisis basado en la combinación de estaciones mediante arreglos de transductores, pues este extendió el rango observable hacia frecuencias menores (Figura 5). En los cuatro arreglos apareció de forma persistente el máximo de 0,001953 Hz, equivalente a 512 s, con 132–144 ocurrencias según la configuración. También se identificó 0,003906 Hz (256 s), además de máximos recurrentes de 64,0 s, 51,2 s y 46,55 s. El resultado confirma que el procesamiento cruzado de los transductores, recupera componentes que no se distinguen al analizar cada ADCP aisladamente.

Figura 5: Espectros cruzados de desnivelaciones de los cuatro arreglos de transductores



Fuente: Elaboración propia

El análisis de los registros de presión mostró su máximo en $1{,}95\times10^{-5}$ Hz (aproximadamente 14,2 h), además de componentes secundarias entre 1,5 y 4 h. Estas frecuencias se encuentran por debajo de las bandas de 30–512 s obtenidas con los arreglos de transductores. En consecuencia, las principales componentes identificadas en ese rango no se atribuyen a la marea astronómica y corresponden a oscilaciones no mareales presentes dentro de la bahía (Tabla 1).

Tabla 1: Síntesis de las principales bandas detectadas instrumentalmente-

Periodo	Frecuencia [Hz]	Clasificación	Fuente
30–55 s	0,018–0,033	Infragravedad	ADCP individuales y arreglos
64–171 s	0,0059–0,0156	Infragravedad	Arreglos
256 s	0,003906	Infragravedad	Arreglos
512 s	0,001953	Largo periodo	Arreglos
1,5–4 h	≈0,00007–0,00018	Largo periodo / componente mareal	Registros de presión
14,2 h	$1{,}95\times10^{-5}$	Marea	Registros de presión

Fuente: Elaboración propia

3.2 Modos naturales obtenidos con MIKE 21 BW

Como escala referencial, se estimaron los periodos naturales de la bahía mediante las formulaciones paramétricas de Rabinovich (2009), adoptando una profundidad media h = 14 m y dos dimensiones características medidas en planta: un ancho de boca L = 4.300 m para la aproximación de cuenca abierta y una longitud L = 3.500 m hacia el interior de la bahía para la aproximación de cuenca cerrada (Tabla 2). Estas expresiones entregan periodos entre 133 y 1.468 s para la cuenca abierta y entre 119 y 597 s para la cerrada, lo que permitió establecer el orden de magnitud de las oscilaciones esperables antes de analizar la respuesta del modelo.

Tabla 2: Periodos naturales obtenidos con ecuaciones paramétricas.

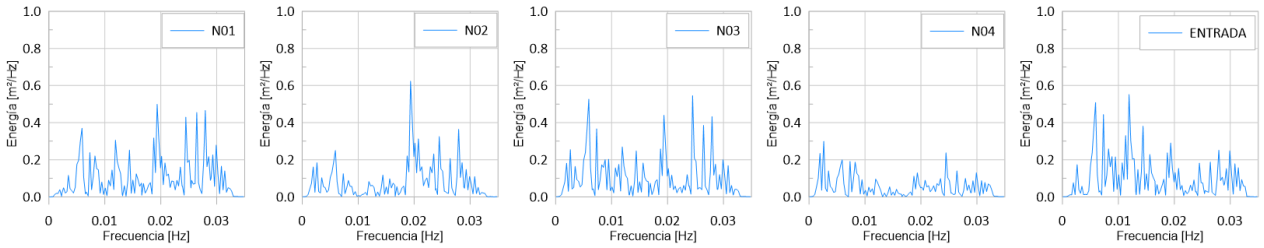
Tipo de cuenca	Periodos naturales [s]					
Modo resonante n	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Abierta – transversal	1.467,7	489,2	293,5	209,7	163,1	133,4
Cerrada – longitudinal	–	597,3	298,7	199,1	149,3	119,5

Fuente: Elaboración propia

La simulación con ruido blanco produjo una respuesta espacial heterogénea (Figura 6). El nodo N02 presentó el máximo energético principal en 0,01935 Hz (51,68 s), mientras que N01 y N03 concentraron varios máximos entre 0,024 y 0,030 Hz (33–41 s). El nodo N04, en el sector más resguardado, mostró menor energía global y concentró sus máximos en las frecuencias más bajas, con periodos de 381 y 512 s. El nodo ENTRADA presentó máximos relevantes en 84,02 s, 69,42 s y 64,00 s.

Es importante indicar que la variabilidad espacial de la energía espectral no necesariamente implica la existencia de mecanismos de generación diferentes entre los puntos analizados, sino que puede representar distintas expresiones espaciales de los mismos modos propios. Esta estructura estaría condicionada principalmente por la geometría del dominio, la distribución de profundidades y los gradientes batimétricos, los cuales controlan las características de propagación, reflexión e interferencia de las ondas largas.

Figura 6: Espectros de energía en los nodos de extracción del modelo.



Fuente: Elaboración propia

En conjunto, los resultados obtenidos mediante el forzamiento con ruido blanco evidencian que el dominio posee una respuesta selectiva frente a determinadas frecuencias, destacándose tanto una banda de periodos relativamente cortos (33–52 s), como oscilaciones de mayor periodo que alcanzan aproximadamente 500 s. Estas frecuencias constituyen candidatos a modos naturales del sistema y proporcionan una base para evaluar posteriormente su correspondencia con los máximos espectrales identificados en las mediciones instrumentales.

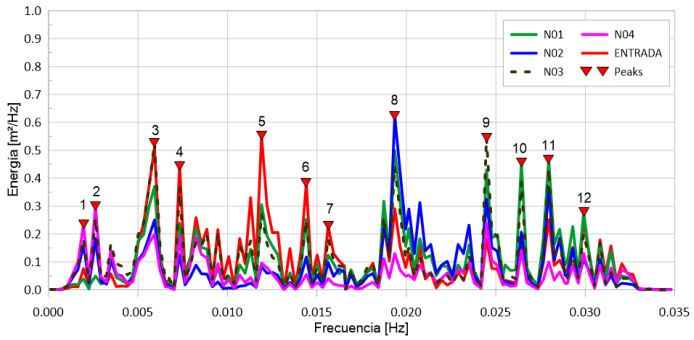
La superposición de los espectros permitió consolidar doce máximos naturales entre 0,001951 y 0,029907 Hz, equivalentes a periodos entre 512,48 y 33,44 s (Figura 7 y Tabla 3). La variación de la energía de una misma banda entre sensores es consistente con la distribución espacial de nodos y antinodos de los modos propios, además de los efectos de la geometría y los gradientes batimétricos.

Tabla 3: Modos resonantes consolidados de la Bahía de Quintero.

#	Nodo	Frecuencia [Hz]	Energía [m²/Hz]	Periodo [s]	Periodo [min]
1	N04	0,0019513	0,234562	512,48	8,54
2	N04	0,0026245	0,299228	381,02	6,35
3	N03	0,0059204	0,526263	168,91	2,82
4	ENTRADA	0,0073242	0,443861	136,53	2,28
5	ENTRADA	0,0119019	0,551699	84,02	1,40
6	ENTRADA	0,0144043	0,381754	69,42	1,16
7	ENTRADA	0,0156246	0,228420	64,00	1,07
8	N02	0,0193481	0,623747	51,68	0,86
9	N03	0,0244751	0,545137	40,86	0,68
10	N01	0,0264282	0,455000	37,84	0,63
11	N01	0,0279541	0,466000	35,77	0,60
12	N01	0,0299072	0,279000	33,44	0,56

Fuente: Elaboración propia

Figura 7: Doce máximos naturales consolidados de la Bahía de Quintero.



Fuente: Elaboración propia

3.3 Comparación entre datos de campo y modelación

La comparación se realizó entre los doce periodos del modelo y la frecuencia instrumental más próxima dentro del rango común de 30–512s (Tabla 4). Tres coincidencias resultaron Excelentes, cuatro fueron Buenas, dos Aceptables, dos Marginales y una no presentó coincidencia satisfactoria.

En total, nueve de las doce comparaciones presentan errores iguales o inferiores al 5 %. La coincidencia exacta de 64 s y los ajustes de 512 s y 51 s, con diferencias inferiores al 1 %, constituyen la evidencia más robusta de correspondencia entre la respuesta natural del modelo y las oscilaciones observadas. El periodo modelado de 381 s constituye la principal excepción: su frecuencia instrumental más cercana fue la asociada a 512 s, con un error de 34,38 %.

Tabla 4: Comparación de periodos modelados y observados en campo

T modelo [s]	T campo [s]	|ΔT| [s]	E_T [%]	Categoría
64,00	64,00	0,00	0,00	Excelente
512,48	512,00	0,48	0,09	Excelente
51,68	51,20	0,48	0,93	Excelente
168,91	170,67	1,76	1,04	Buena
84,02	85,33	1,31	1,56	Buena
33,44	34,13	0,69	2,07	Buena
35,77	36,57	0,80	2,24	Buena
37,84	36,57	1,27	3,35	Aceptable
40,86	39,38	1,48	3,61	Aceptable
69,42	73,14	3,72	5,36	Marginal
136,53	128,00	8,53	6,25	Marginal
381,02	512,00	130,98	34,38	No coincide

Fuente: Elaboración propia

4 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

La identificación de ondas largas mostró una dependencia clara de la configuración instrumental. Los ADCP individuales resolvieron adecuadamente la franja de infragravedad, mientras que las oscilaciones de varios minutos aparecieron con mayor claridad mediante arreglos espaciales. La coherencia y fase entre estaciones amplían el rango de detección y reducen el riesgo de interpretar máximos locales como representativos de toda la bahía.

La concordancia entre los datos de campo y modelo indica que una parte importante de las bajas frecuencias observadas es compatible con modos naturales de la Bahía de Quintero. Esta conclusión se refiere a la existencia y frecuencia de los modos, y no a su magnitud operacional, dado que el ruido blanco es un forzamiento sintético de magnitud constante en las frecuencias.

La respuesta también varía espacialmente: el modo cercano a 51s alcanza su mayor energía en N02, las componentes de 381–512s se expresan con mayor claridad en N04 y el modo de 64s destaca en la entrada. Esto es consistente con la distribución de nodos y antinodos de los modos propios.

La metodología presenta limitaciones instrumentales y numéricas. Un único equipo no representa adecuadamente la estructura espacial de una onda larga, mientras que las simplificaciones del modelo y el filtrado del postproceso pueden afectar la estimación de algunos máximos. La incorporación de estados de mar reales, mareas, disipación y condiciones meteorológicas permitiría determinar qué modos se excitan bajo condiciones operacionales. Sin embargo, la combinación de mediciones de campo y modelación numérica permitió identificar ondas largas y modos resonantes en la Bahía de Quintero. Los ADCP individuales detectaron componentes de infragravedad entre 30 y 55s, mientras que los arreglos espaciales ampliaron el rango observable

e identificaron oscilaciones de 256 y 512s. Las bandas mareales se encontraron claramente separadas de las principales componentes de 30–512s.

El modelo MIKE 21BW forzado con el ruido blanco descrito, identificó doce máximos naturales entre 33,44 y 512,48 s. Nueve de las doce comparaciones con datos de campo presentaron errores ≤5 %, destacando las coincidencias de 64s, 51s y 512s. La correspondencia obtenida sustenta una respuesta resonante controlada por la geometría y la batimetría de la bahía.

Desde el punto de vista metodológico, se recomienda utilizar al menos tres equipos en configuración triangular y, cuando sea posible, cuatro en configuración tipo estrella para aumentar la redundancia espacial y robustecer la estimación espectral de las ondas de largas. Esto resulta fundamental a la hora de ejecutar las mediciones de oleaje, pues si bien el empleo de un solo instrumento para ondas largas se menciona en los instructivos oceanográficos vigentes para las costas chilenas, la evidencia muestra que no sería suficiente.

5 REFERENCIAS

Buchwald, V. T., & De Szoeke, R. A., 1973. The response of a continental shelf to travelling pressure disturbances. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 24(2), 143-158.

Cosio, E., 2016. Efectos en la agitación y resonancia de los sitios de atraque debido a la construcción del Frente N°3, Puerto de Iquique. Memoria de título, Universidad de Valparaíso, Chile.

DHI, 2017. MIKE 21 Boussinesq Wave Module. Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute, Hørsholm, Dinamarca.

Dong, G., Gao, J., Ma, X., Wang, G., & Ma, Y., 2013. Numerical study of low-frequency waves during harbor resonance. Ocean Engineering, 68, 38-46.

Dong, G., Yan, M., Zheng, Z., Ma, X., Sun, Z., & Gao, J., 2022. Experimental investigation on the hydrodynamic response of a moored ship to low-frequency harbor oscillations. Ocean Engineering, 262, 112261.

Gao, J., Ji, C., Gaidai, O., & Liu, Y., 2016. Numerical study of infragravity waves amplification during harbor resonance. Ocean Engineering, 116, 90-100.

Gierlevsen, T., Hebsgaard, M., & Kirkegaard, J., 2001. Wave disturbance modelling in the Port of Sines, Portugal - with special emphasis on long period oscillations. Proceedings International Conference on Port and Maritime R&D and Technology, Singapore, 8 pp.

Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. Tokyo.

González-Marco, D., Sierra, J. P., de Ybarra, O. F., & Sánchez-Arcilla, A., 2008. Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. Ocean & Coastal Management, 51(2), 180-201.

Guerrini, M., Bellotti, G., Fan, Y., & Franco, L., 2014. Numerical modelling of long waves amplification at Marina di Carrara Harbour. Applied Ocean Research, 48, 322-330.

Hibiya, T., & Kajiura, K., 1982. Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 38, 172-182.

Kofoed-Hansen, H., Kerper, D. R., Sørensen, O. R., & Kirkegaard, J., 2005. Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain Boussinesq model. Proceedings WAVES 2005, Madrid, Spain.

Lemon, D., LeBlond, P., & Osborn, T., 1979. Seiche excitation in Port San Juan, British Columbia. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 36, 1223-1227.

Lepelletier, T., & Raichlen, F., 1987. Harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 113, 381-400.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964, August). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. In *Deep sea research and oceanographic abstracts* (Vol. 11, No. 4, pp. 529-562). Elsevier.

Nwogu, O., 2001. Time domain simulation of long period oscillations in harbors. Coastal Engineering 2000, ASCE, 283-296.

Ota, K., Yoshida, A., Yamashiro, M., Aki, T., & Nishii, Y., 2010. Accuracy of long wave simulation in harbors by Boussinesq model. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering), 66(1), 166-170.

Rabinovich, A. B., 2009. Seiches and harbor oscillations. In Handbook of Coastal and Ocean Engineering. World Scientific, 193-236.

Rossouw, J., Rossouw, M., & van der Molen, A., 2014. Characterising long wave agitation in the Port of Ngqura using a Boussinesq wave model. Proceedings 34th International Conference on Coastal Engineering, Seoul, Korea.

Sakakibara, S., & Kubo, M., 2008. Characteristics of low-frequency motions of ships moored inside ports and harbors on the basis of field observations. Marine Structures, 21(2-3), 196-223.

Stuart, D., Toms, G., Luger, S., & Rossouw, M., 2014. Characterizing long wave agitation in the Port of Ngqura using a Boussinesq wave model. Coastal Engineering Proceedings.

Uzaki, K., Matsunaga, N., Nishii, Y., & Ikehata, Y., 2010. Cause and countermeasure of long-period oscillations of moored ships and the quantification of surge and heave amplitudes. Ocean Engineering, 37(2-3), 155-163.

WAFO Group, 2017. WAFO - A MATLAB toolbox for analysis of random waves and loads. Tutorial for WAFO 2017. Lund University, Sweden.

Yanuma, T., & Tsuji, Y., 1998. Observation of edge waves trapped on the continental shelf in the vicinity of Makurazaki Harbor, Kyushu, Japan. Journal of Oceanography, 54, 9-18.