

MEMORIA DE PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
OCEÁNICO

Estudio de onda larga en la Bahía de Quintero

Jordy Andrés González Garrido

Profesor guía: Matías Quezada | Comisión: Eduardo Cosío · Sebastián Correa

Contenido de la presentación

01

Contexto y motivación

La Bahía de Quintero como polo industrial-portuario y sus riesgos operacionales

02

Objetivos y alcances

Qué se busca responder y bajo qué condiciones

03

Metodología

Enfoque mixto: instrumental (4 ADCP) + numérico (MIKE 21 BW)

04

Resultados instrumentales

Espectros cruzados: ondas de infragravedad y de largo período

05

Modelación numérica

Espectro de ruido blanco y modos resonantes de la bahía

06

Comparación y conclusiones

Validación campo vs. modelo y recomendaciones

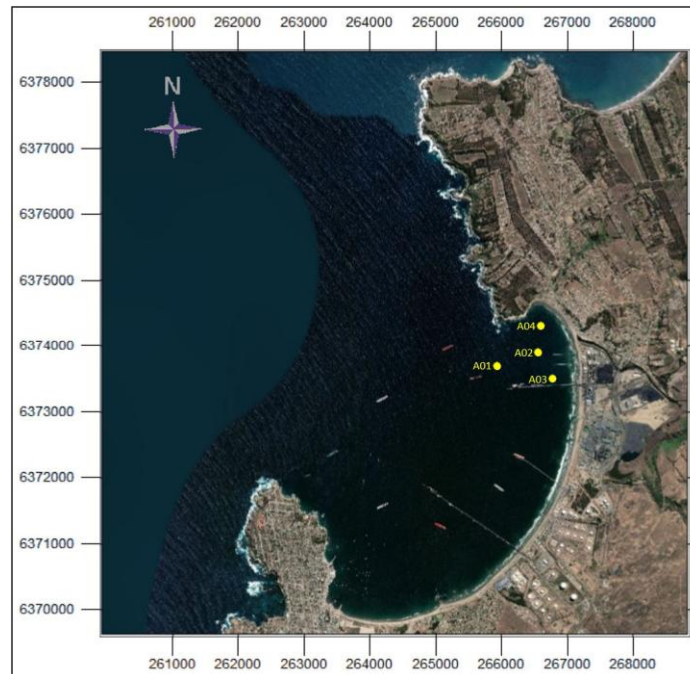
Una bahía industrial con riesgos reales

La Bahía de Quintero, en la región de Valparaíso, concentra refinерías, plantas termoeléctricas, terminales portuarios e industrias químicas, lo que la ha convertido en una denominada “zona de sacrificio”.

Las condiciones dinámicas del mar han provocado incidentes graves por corte de espías en el Puerto de Ventanas: tres lesionados en 2016 y un tripulante fallecido en 2021.

Las ondas largas y su eventual resonancia amplifican la energía dentro de la bahía, aumentando la agitación y afectando estructuras costeras y operaciones portuarias.

Pregunta central: ¿existen ondas largas en la bahía y coinciden con sus modos resonantes naturales?



Bahía de Quintero y posiciones de medición

Estado del arte: resonancia en bahías y puertos

Munk (1951)

Identifica el surf beat: interacción no lineal del oleaje corto que genera oscilaciones de largo período observables en la costa.

Yanuma & Tsuji (1998) · Lemon et al. (1979)

Mediciones in situ identifican períodos resonantes asociados a ondas de borde en Japón y Canadá.

Buchwald & Soeke (1973) · Hibiya & Kajiura (1982)

Forzantes atmosféricas (frentes de presión) inducen oscilaciones resonantes en bahías de Australia y Japón.

Kofoed-Hansen et al. (2005) · Gierlevsen et al. (2001) · Cosio (2016)

Modelación numérica con espectro de ruido blanco permite determinar períodos resonantes sin mediciones previas, en una sola ejecución.

Brecha abordada

Combinar mediciones in situ (4 ADCP) con modelación de ruido blanco para identificar ondas largas y contrastar los modos resonantes de la Bahía de Quintero.

Objetivo general y objetivos específicos

OBJETIVO GENERAL Analizar la presencia, agitación y resonancia de ondas largas en la Bahía de Quintero debido a su configuración morfológica.

1

Identificar, mediante datos de campo, la existencia de ondas con períodos largos.

2

Sensibilizar la detección de onda larga instrumental con arreglos de ADCP.

3

Caracterizar las ondas encontradas, diferenciando onda larga de oleaje y mareas.

4

Modelar numéricamente la bahía (Boussinesq) y determinar sus modos resonantes con espectro de ruido blanco.

5

Comparar los modos resonantes simulados con los datos de campo.

Alcances y limitaciones del estudio

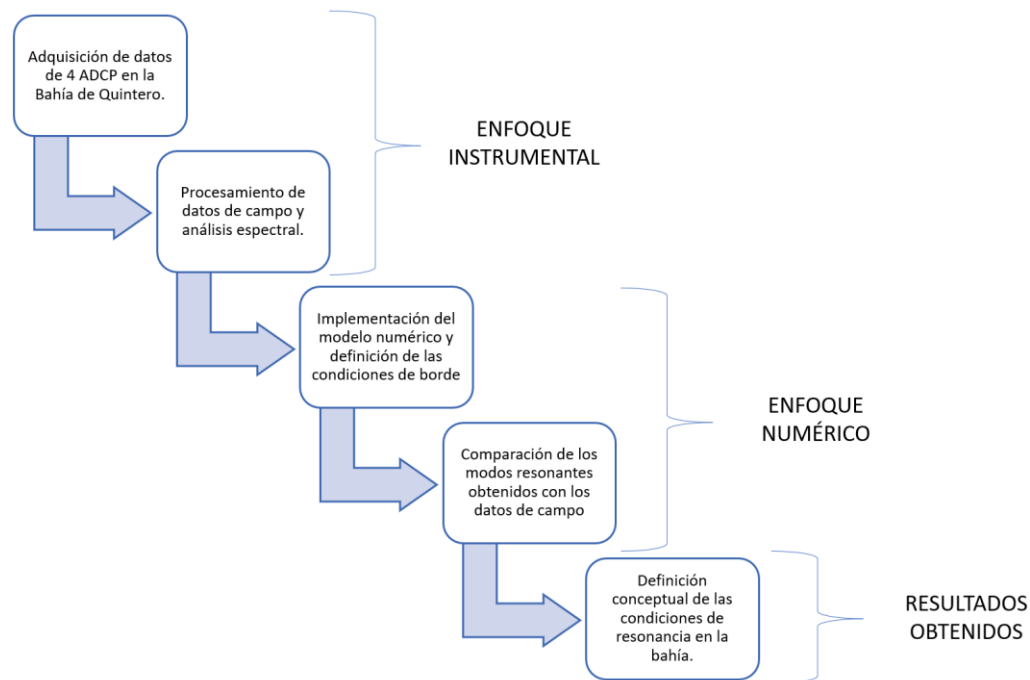
Alcances

- La caracterización de ondas largas no incluye la determinación del sea y el swell.
- No se consideran coeficientes de agitación asociados a oleaje operacional.
- Se emplea información disponible de distintas fuentes, con datos aportados por Ecotecnos.

Limitaciones

- La base batimétrica está sujeta a la información disponible (SHOA, SEIA, Ecotecnos), sin recursos para actualizarla.
- Sin financiamiento para campañas de medición propias.
- El modelo no incorpora fricción de fondo, viscosidad, rotura de oleaje ni modulación mareal del nivel medio.

Enfoque mixto: instrumental + numérico



Mapa conceptual del procedimiento metodológico

Enfoque instrumental

4 ADCP en la bahía (≈ 29 días). Control de calidad, filtrado armónico de marea y análisis espectral con WAFO (MATLAB), método bayesiano BDM.

Enfoque numérico

MIKE 21 BW (Boussinesq, DHI). Simulación forzada con espectro de ruido blanco para excitar los modos propios de la bahía.

Validación

Comparación de frecuencias instrumentales vs. modos resonantes simulados mediante error relativo absoluto.

Del dato crudo al peak espectral

1

Control calidad

Se descartan registros anómalos o erráticos.

2

Filtrado marea

Se remueve la componente astronómica de marea.

3

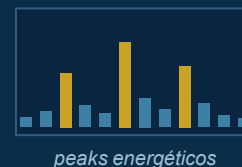
Series/bloques

Los 4 transductores se ordenan por instante.

4

WAFO → peaks

Se estima $S(f, \theta)$ y se detectan los peaks.



Configuración dat2dspec

nfft = 512
puntos de la FFT

nt = 360
ángulos de dirección

method = 'BDM'
estimación bayesiana

pos, h
coord. UTM y prof. por transductor

4

transductores
por equipo

Resultado: frecuencias características de cada ADCP, listas para contrastar con los modos resonantes del modelo numérico.

¿Qué es el espectro direccional?

cuánta energía

 $S(f)$

por frecuencia

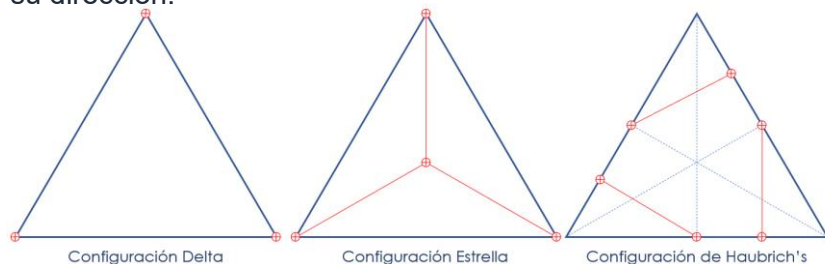
+
dirección

cuánta energía

 $S(f, \theta)$

y desde dónde viene

Se obtiene del desfase entre transductores: la misma onda llega a cada sensor en un instante distinto, y ese retardo revela su dirección.



Arreglo estrella

4 elementos: 3 en los vértices + 1 al centro. Entrega más pares de sensores y más ángulos independientes que el arreglo delta (3 elementos).

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

Método	Principio	Uso
DFTM	Serie de Fourier truncada	Baja resolución
EMLM	Máxima verosimilitud	Rápido
MEP	Máxima entropía	3 elementos
BDM	Bayesiano: ajusta la forma directamente a los datos	≥ 4 elementos

¿Por qué BDM?

3 elementos: los errores del espectro cruzado son difíciles de evaluar y el BDM no rinde bien → se recomienda MEP.

4 o más elementos: el BDM es el que mejor funciona entre estos métodos.

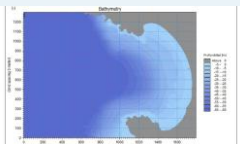
(Goda, 1985)

Cómo se construye el modelo numérico

1

Dominio

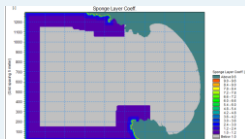
Batimetría rotada 45° para que el oleaje W entre paralelo al borde.



2

Bordes

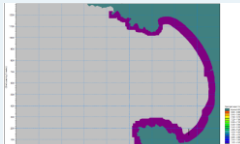
Capas de esponja absorben la energía y evitan reflexiones.



3

Porosidad

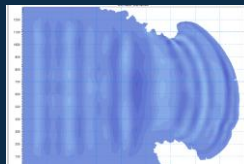
Capa de 250 m que representa la disipación en playas.



4

Ruido blanco

Igual energía en todas las frecuencias: la bahía amplifica sus modos.



Configuración MIKE 21 BW

1800 × 1300 @ 5 m
grilla; prof. 5–60 m

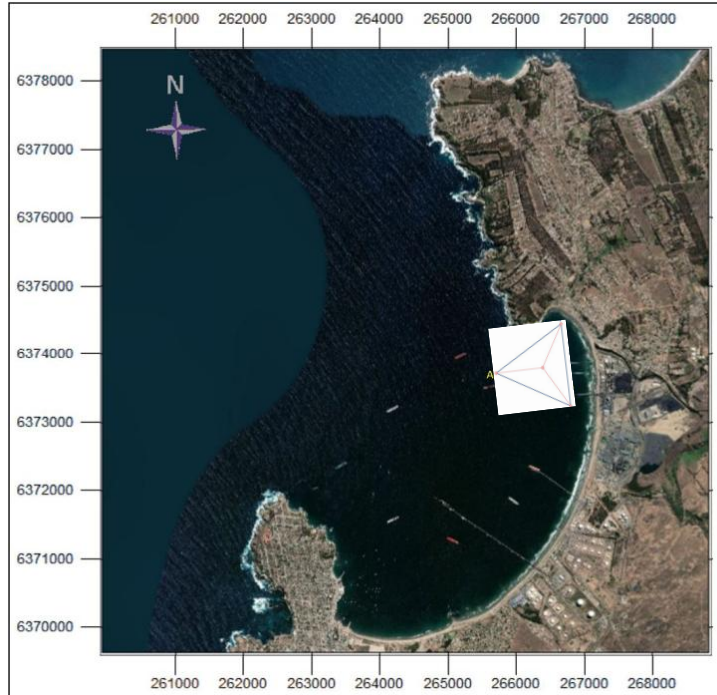
$T = 30 - 1000$ s
0.001 – 0.033 Hz

$dt = 0.1$ s
108 010 pasos · 180 min

Courant = 0.485
< 1 → estable

Resultado: los modos resonantes propios de la bahía, extraídos en los nodos N01–N04 y ENTRADA.

Campaña de medición: 4 ADCP en la bahía



Ubicación de cada ADCP (UTM 19S – WGS84)

Equipo	Latitud [°]	Longitud [°]	Prof. [m]
A01	-32.7497	-71.4981	-22.9
A02	-32.7481	-71.4916	-14.2
A03	-32.7515	-71.4894	-10.4
A04	-32.7446	-71.4911	-10.1

Campaña: 20 de mayo al 18 de junio de 2019 ($\approx$ 29 días continuos).

Equipos: Teledyne RDI WHS600; estados de mar de 180 min cada registro de 40 min, muestreo 2 Hz (4800 datos por intervalo).

Hallazgo preliminar: procesados de forma aislada, los ADCP no detectan onda larga: períodos máximos $\approx$ 20 s (swell típico chileno, dirección W, Hs hasta 2 m).

Huellas visuales de onda larga en la Bahía de Quintero

Las ondas largas concentran energía en puntos específicos del borde costero y generan ondulaciones regulares en la línea de costa: beach cusps o cúspides de playa.

El análisis de imágenes satelitales históricas (Google Earth) revela estos patrones ondulatorios bien definidos cerca del terminal portuario de Ventanas, en fechas tan distantes como marzo de 2010 y junio de 2018.

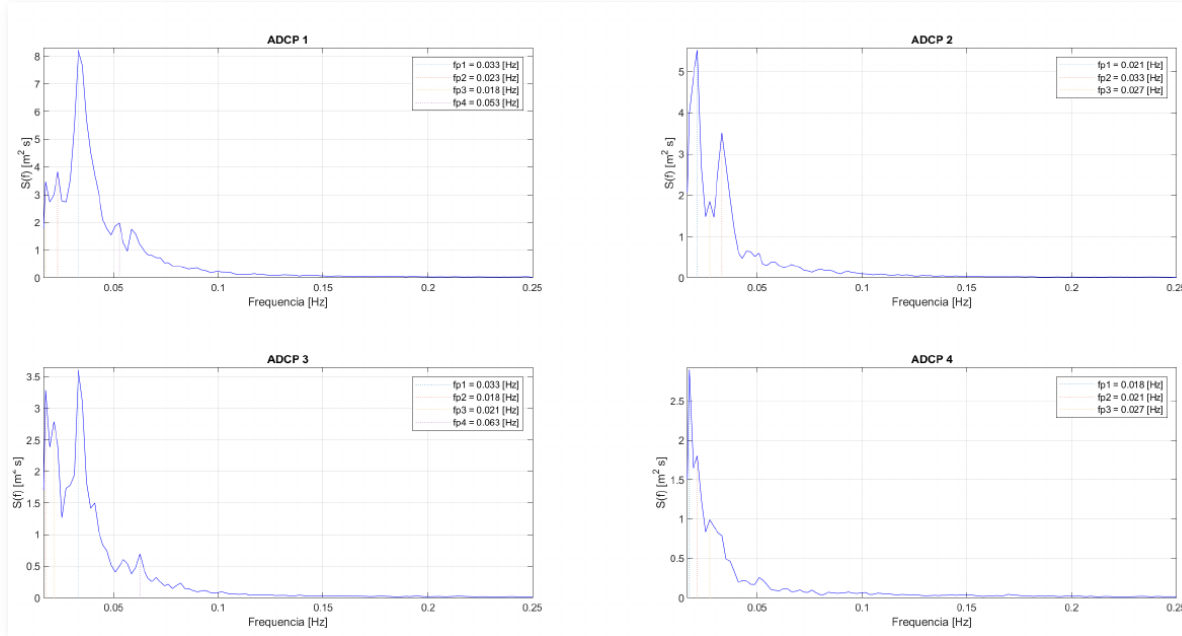
Su persistencia temporal sugiere un mecanismo de forzamiento recurrente, consistente con la presencia de ondas de largo período en la bahía.



Beach cusps fre

) y 2018 (abajo)

Espectro cruzado por ADCP: infragravedad



Espectros cruzados individuales por ADCP (Figura 12)

30 – 55 s

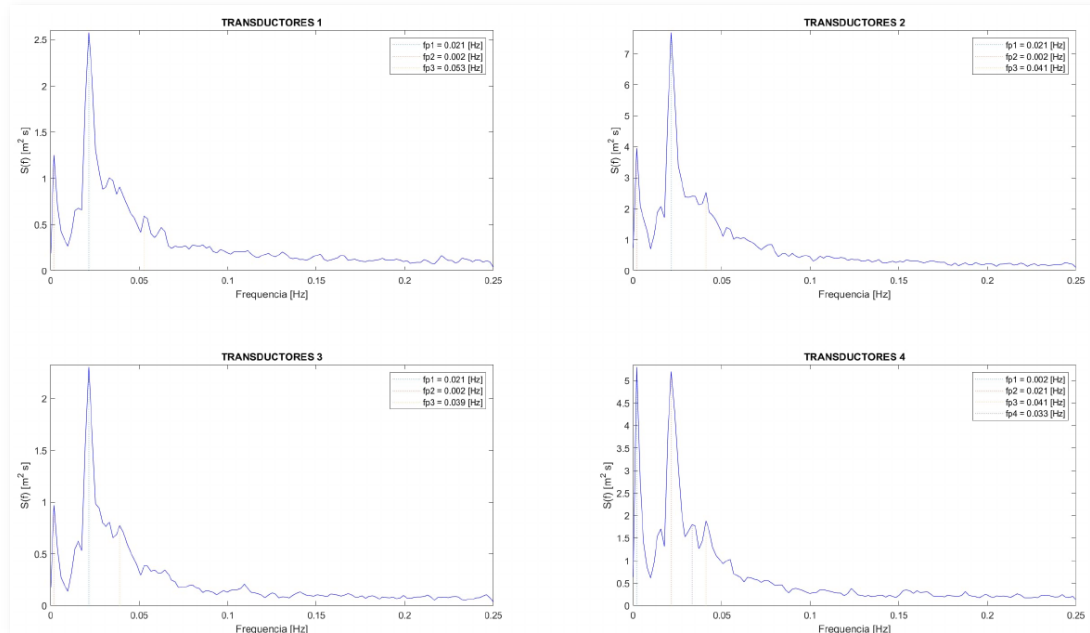
banda dominante de energía
(0.018 – 0.033 Hz)

Cada ADCP aporta 4 transductores: el espectro cruzado se aplica equipo por equipo.

Peaks consistentes en los 4 sensores, con mayor definición en A01 y A03 (hasta 4 peaks).

Períodos correspondientes a ondas de infragravedad, generadas por viento y oleaje.

Arreglos de transductores: el largo período



Espectro cruzado combinando transductores entre estaciones

Al combinar transductores de las 4 estaciones (arreglos en estrella, 4 configuraciones representativas de 16 posibles) aparecen frecuencias que el análisis individual no resolvía:

- 512 s y 256 s: ondas de largo período, las más recurrentes en todos los arreglos (hasta 144 repeticiones).
- 51.2 s y 46.6 s: banda de infragravedad, consistente con el análisis por ADCP.
- Períodos intermedios (64 s, 37 s) con repetición menor pero presentes en varios arreglos.

Síntesis: tres familias de oscilaciones



Ondas mareales

≈ 14.2 h

Peak principal en $1.95 \cdot 10^{-5}$ Hz (ciclo semidiurno), con secundarios de minutos a pocas horas, obtenidos del espectro cruzado de registros de presión.



Largo período

256 – 512 s

Detectadas solo con arreglos de transductores entre estaciones; la frecuencia de 512 s es la más recurrente de todo el análisis.



Infragravedad

30 – 55 s

Detectadas de forma consistente por cada ADCP individual y confirmadas en los arreglos; forzadas por viento y oleaje.

La comparación con los constituyentes armónicos de marea confirma la existencia de oscilaciones no mareales en la bahía.

Recurrencia de los peaks por arreglo

Frecuencia Peak [Hz]	Periodo Peak [s]	Conteo			
		Tr1	Tr2	Tr3	Tr4
0.00195313	512.00	132	144	144	144
0.01953125	51.20	87	91	94	94
0.02148438	46.55	52	54	52	52
0.0390625	25.60	45	42	39	39
0.01757813	56.89	44	40	36	36
0.03320313	30.12	37	35	38	38
0.0234375	42.67	36	38	36	36
0.03125	32.00	37	33	38	38
0.02539063	39.38	32	34	34	34
0.03515625	28.44	28	30	35	35
0.046875	21.33	32	32	31	31
0.04296875	23.27	31	28	30	30
0.02929688	34.13	29	28	29	29
0.03710938	26.95	30	24	30	30
0.02734375	36.57	29	26	29	29
0.04492188	22.26	27	29	25	25
0.04101563	24.38	26	30	24	24
0.015625	64.00	28	26	23	23
0.05078125	19.69	22	17	25	25
0.04882813	20.48	14	18	22	22
0.05664063	17.66	16	14	16	16
0.05273438	18.96	16	14	9	9
0.0546875	18.29	16	12	8	8
0.01367188	73.14	12	9	10	10
0.00390625	256.00	4	4	6	6
0.01171875	85.33	3	4	3	3
0.0078125	128.00	2	1	2	2
0.00976563	102.40	0	0	3	3
0.00585938	170.67	2	1	1	1

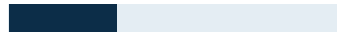
512 s

único peak de período largo (> 5 min) · 564 repeticiones

CLASIFICACIÓN SEGÚN TABLA 1 (SILVA, 2005)

Infragravedad 30 s – 5 min  **49.7 %**
16 peaks

Gravedad 1 – 30 s  **34.0 %**
12 peaks

Período largo 5 min – 12 h  **16.2 %**
1 peak

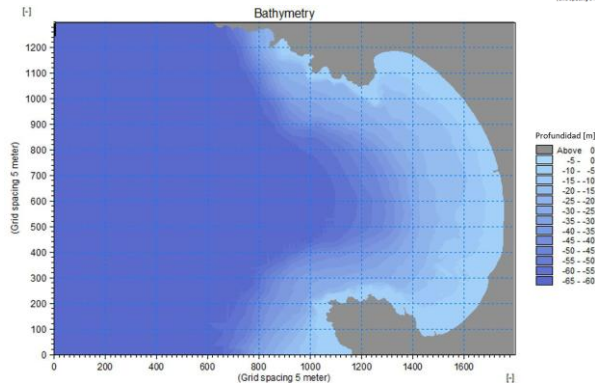
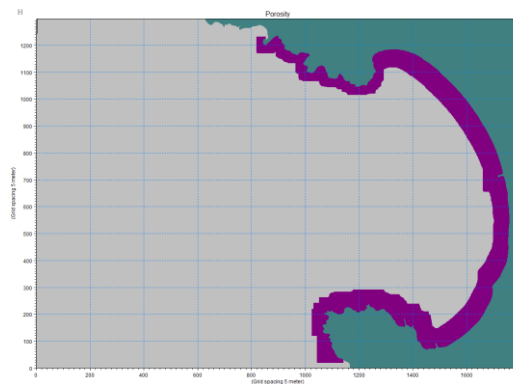
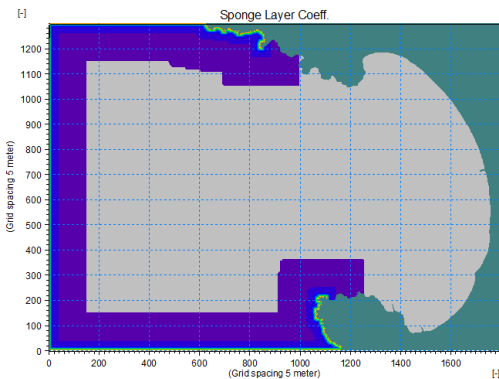
Predominio de la infragravedad La mitad del conteo (49.7 %) cae en 30 s – 5 min, la banda que los ADCP individuales ya detectaban.

Un único peak de período largo Los 512 s son el solo representante de la banda > 5 min, pero el más recurrente de toda la tabla.

Consistencia entre arreglos Los peaks dominantes se repiten en Tr1–Tr4 con dispersión < 9 %: no son artefactos de una combinación.

Tabla 8. Conteo de repeticiones por arreglo de transductores, ordenada de mayor a

MIKE 21 BW: configuración del modelo



Dominio numérico rotado 45° respecto al norte

Modelo

Ecuaciones de Boussinesq, malla de diferencias finitas (DHI).

Dominio

Grilla de 1800×1300 puntos, espaciamiento 5 m; profundidades acotadas entre 5 y 60 m (NRS).

Condiciones de borde

Capas de esponja (absorción) y de porosidad 0.95 (250 m, representativa de playas) para evitar reflexiones.

Verificación

Simulación TMA de 3 h: altura de ola estable en los 4 nodos → estabilidad numérica garantizada.

Simulación con espectro de ruido blanco

Concepto: se fuerza el modelo con una señal sintética de igual energía en todas las frecuencias; la bahía amplifica solo sus modos propios.

Estimación paramétrica previa: períodos naturales entre ≈ 133 s y 24 min (cuenca abierta/cerrada), que orientan el rango de simulación.

30 – 1000 s

Rango de períodos

180 min

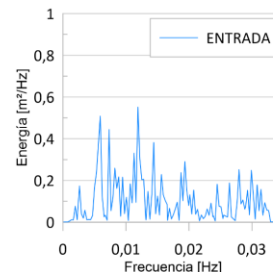
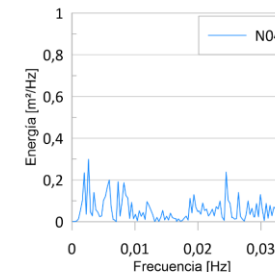
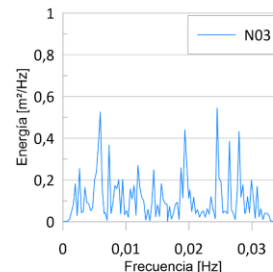
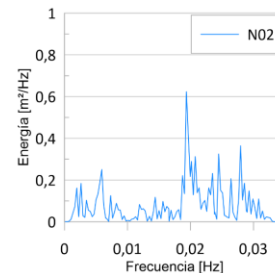
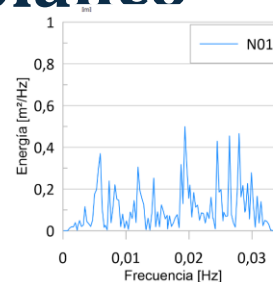
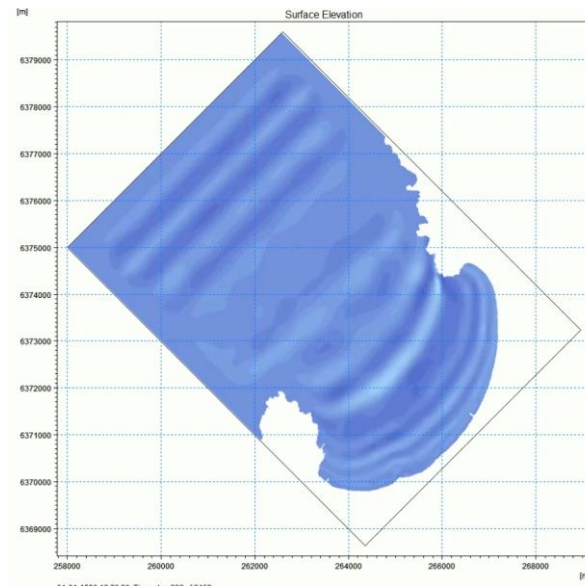
Duración

0.001 – 0.033 Hz

Frecuencias

0.1 s

Paso temporal

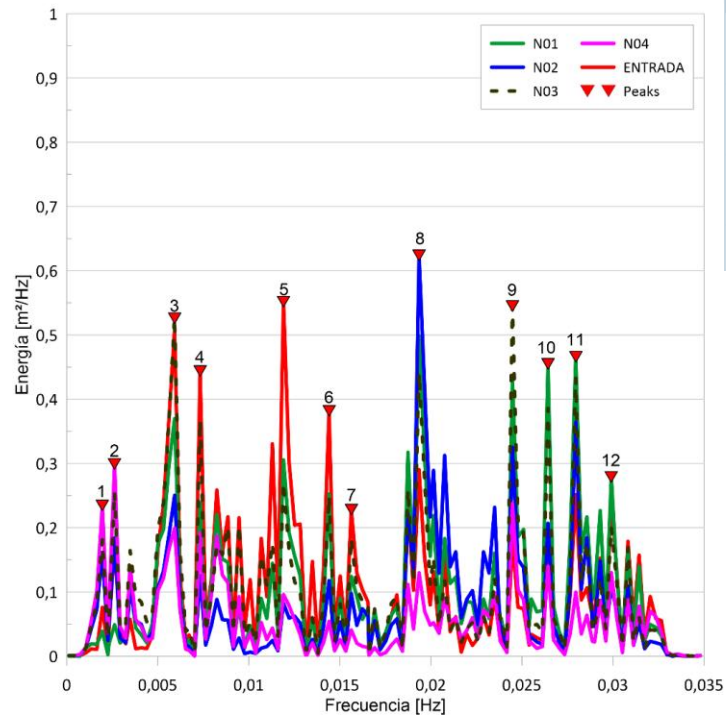


TIEMPO DE SIMULACIÓN (MINUTOS)

Modos resonantes naturales de la bahía

Respuesta heterogénea entre nodos (nodos, geometría, gradientes batimétricos y transferencia de energía por la boca de la bahía).

El nodo ENTRADA comparte peaks con el interior → respuesta resonante del sistema.



12 peaks consolidados entre nodos

Nodo	Período [s]	Observación
N04	512 / 381	Zona resguardada; energía en muy baja frecuencia
ENTRADA	137 / 84 / 69 / 64	Modos que también aparecen al interior
N02	51.7	Peak más energético del conjunto
N03 / N01	41 / 38 – 33	Banda de infragravedad

Tabla 13. Valores de los modos resonantes 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	0,22842	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	0,45500	37,84	0,63
11	N01	0,0279541	0,46600	35,77	0,60
12	N01	0,0299072	0,27900	33,44	0,56

Fuente: Elaboración propia

Comparación campo vs. modelo

T modelo [s]	T campo [s]	Error	Categoría
64.00	64.00	0.00 %	Excelente
512.48	512.00	0.09 %	Excelente
51.68	51.20	0.93 %	Excelente
168.91	170.67	1.04 %	Buena
84.02	85.33	1.56 %	Buena
33.44	34.13	2.07 %	Buena
35.77	36.57	2.24 %	Buena

3 modos con ajuste excelente

512 s · 64 s · 51 s

Diferencias del orden de décimas de segundo respecto a los datos de campo.

Distribución espacial: el período de 64 s impacta con mayor intensidad la ENTRADA; el de 512 s el entorno de N04; y el de 51 s el nodo N02, el más energético de la modelación.

Mejores 7 de 12 coincidencias; criterio: $Et \leq 1\%$ excelente, $\leq 3\%$ buena (Tabla 15)

Conclusiones principales

Existen ondas largas no mareales en la bahía

El análisis espectral de los ADCP identifica de forma consistente ondas de infragravedad (30–55 s) y de largo período (256–512 s), diferenciadas de oleaje y marea.

El modelo reproduce los modos resonantes

MIKE 21 BW con ruido blanco identifica 12 modos naturales; los de 512, 64 y 51 s muestran concordancia excelente con campo (errores ≤ 1 %).

El método de procesamiento importa

Un ADCP aislado resuelve solo la banda 30–55 s; los arreglos en estrella recuperan coherencia entre estaciones y extienden el rango a períodos de 4–9 min.

Zonas de la bahía son más susceptibles al acople resonante

La energía varía según la posición (nodos/antinodos): información clave para evaluar el riesgo operativo portuario.

Recomendaciones y líneas futuras

Diseño de campañas

Mínimo 3 equipos (configuración delta, método MEP); idealmente 4 en estrella, que añade redundancia angular y habilita el método bayesiano (BDM) con mejor desempeño.

Perfeccionar el modelo

Incorporar fricción de fondo, viscosidad, rotura de oleaje y modulación mareal del nivel medio; afinar el post-procesado espectral (filtrado y limpieza de peaks).

Escenarios futuros

Evaluar condiciones oceanográficas y meteorológicas alternativas, incluyendo tendencias de cambio climático (clima de oleaje y nivel del mar).



Muchas gracias

Estudio de onda larga en la Bahía de Quintero

Jordy Andrés González Garrido · Escuela de Ingeniería Civil Oceánica · Universidad de Valparaíso

ANEXOS DE RESPALDO

Enfoque instrumental

Campaña de medición, procesamiento espectral y análisis de recurrencia

- 1 Configuración de la FFT
- 2 Representatividad de la campaña
- 3 Selección de los arreglos
- 4 Cobertura espacial de los equipos
- 5 Espectro direccional y método BDM
- 6 Líneas espectrales vs. modos reales
- 7 Beach cusps como antecedente
- 8 Mecanismo generador de los 512 s

¿Por qué se configuró la FFT en `dat2dspec` con ese número de puntos?

El parámetro `nfft` define la resolución en frecuencia del espectro mediante $\Delta f = f_s / nfft$. Esa resolución determina cuán finamente se pueden distinguir dos peaks vecinos, y por lo tanto qué períodos el análisis es capaz de separar.

La elección responde a un compromiso. Un número mayor de puntos entrega mejor resolución en frecuencia, pero exige bloques más largos y reduce la cantidad de bloques disponibles para promediar, lo que aumenta la varianza del estimador espectral. Un número menor entrega un espectro más estable estadísticamente, pero no permite resolver peaks cercanos entre sí.

Con registros de 4800 datos por estado de mar, la configuración adoptada permite promediar varios bloques manteniendo una resolución suficiente en la banda de interés del estudio.

Datos de respaldo

$\Delta f = 0,001953$ Hz

resolución en frecuencia

$T_{\text{máx}} = 512$ s

primera línea espectral ($k=1$)

29 líneas

hasta 17,66 s ($k=29$)

En síntesis: la resolución espectral es la que fija qué períodos puede discriminar el análisis, y explica por qué los peaks aparecen en valores discretos.

¿Una campaña de 29 días es representativa del comportamiento de la bahía?

Los modos resonantes son una propiedad geométrica de la cuenca: dependen de su forma, extensión y batimetría, factores que no varían estacionalmente. Lo que cambia a lo largo del año es la cantidad de energía que llega a excitar esos modos, no cuáles son los modos.

El respaldo decisivo es que el modelo numérico es independiente de la campaña: se fuerza con un espectro de ruido blanco, no con los datos de campo. Que ambos métodos converjan a los mismos períodos confirma que el resultado no depende de las condiciones particulares de mayo y junio de 2019.

Adicionalmente, la duración se ajusta a la práctica recomendada por el SHOA de al menos 30 días de registro para estudios de oleaje previos a modelación numérica.

Datos de respaldo

512,00 s

período de campo

512,48 s

período del modelo

0,09 %

error relativo

En síntesis: la campaña permite identificar qué períodos resuenan. Determinar con qué frecuencia se excitan a lo largo del año requeriría un registro plurianual.

¿Por qué se analizaron cuatro configuraciones de arreglo y no todas las combinaciones posibles?

La razón es de escalas. Los cuatro transductores de un mismo ADCP están separados por centímetros, mientras que las estaciones entre sí lo están por cientos de metros. Lo que define la geometría del arreglo, y por lo tanto su resolución direccional, es la distancia entre estaciones.

Cambiar cuál transductor se toma de cada equipo modifica la geometría del arreglo en centímetros sobre una base de cientos de metros: una diferencia despreciable para el cálculo del espectro cruzado.

Las cuatro configuraciones se presentan como control de consistencia. Los peaks dominantes se repiten en las cuatro con dispersión inferior al 9 %, lo que verifica que el resultado no depende de la combinación escogida.

Arreglo	512 s	51,2 s
Tr1	132	87
Tr2	144	91
Tr3	144	94
Tr4	144	94

En síntesis: las diferencias menores entre arreglos provienen de la variabilidad estadística de cada serie, no de un cambio en la geometría de medición.

Los cuatro ADCP cubren un área reducida del sector norte. ¿Cómo se caracteriza toda la cuenca?

La limitación espacial corresponde a la campaña instrumental disponible, no al modelo. El dominio numérico, de 1800 por 1300 puntos, abarca la bahía completa, y la resonancia es una respuesta global del sistema: cuando la cuenca resuena en un período dado, lo hace en toda su extensión, con nodos y antinodos distribuidos según la geometría.

Como control espacial se incorporó el nodo ENTRADA, ubicado en la boca de la bahía y separado varios kilómetros del grupo de equipos. La coincidencia de peaks entre ese nodo y los interiores confirma que los períodos identificados corresponden a modos de toda la cuenca y no a un fenómeno local.

Los nodos de extracción se ubicaron en las coordenadas de los ADCP porque el objetivo era comparar modelo y mediciones en puntos homólogos.

En síntesis: extender la extracción a una malla distribuida permitiría mapear espacialmente los antinodos, lo que queda propuesto como línea futura.

¿Qué es el espectro direccional y por qué se empleó el método bayesiano?

El espectro de frecuencia $S(f)$ indica cuánta energía hay en cada frecuencia. El espectro direccional $S(f, \theta)$ agrega la dirección: informa además desde dónde proviene esa energía. Se obtiene del desfase entre transductores, ya que una misma onda alcanza cada sensor en un instante distinto y ese retardo revela su dirección de propagación.

Respecto al método de estimación, para un sistema de medición de tres elementos la evaluación de los términos de error contenidos en los espectros cruzados se vuelve difícil y el BDM no funciona satisfactoriamente, por lo que se recomienda el MEP. Sin embargo, para un sistema de cuatro o más elementos el BDM es el que funciona mejor entre los métodos disponibles.

El arreglo estrella empleado tiene cuatro elementos, lo que sitúa el caso en el rango donde el método bayesiano presenta mejor desempeño.

Fuente: la referencia del criterio de selección es Goda (1985).

Los períodos detectados coinciden con las líneas espectrales de la FFT. ¿Cómo se distingue un modo real de un artefacto del análisis?

El primer argumento es la recurrencia diferencial. Todas las líneas espectrales están igualmente disponibles para el análisis, de modo que si los peaks fueran artefactos de la resolución, aparecerían con frecuencia comparable entre sí. Lo observado es lo contrario: un peak concentra la recurrencia y las líneas vecinas resultan marginales.

El segundo argumento, y el más concluyente, es la validación numérica. El modelo de Boussinesq no comparte la configuración espectral del análisis instrumental y entregó un valor continuo que no corresponde a ninguna línea de la FFT. La convergencia de dos métodos con grillas de frecuencia distintas sobre el mismo período constituye evidencia de un modo físico real.

Período	Repeticiones
512,00 s	564
256,00 s	20
170,67 s	5
128,00 s	7
102,40 s	6

En síntesis: la asimetría de 564 contra 20 repeticiones no puede explicarse por la grilla de frecuencias: indica concentración real de energía.

¿Qué relación se estableció entre los beach cusps observados y los períodos identificados?

Las imágenes satelitales se presentan como antecedente del estudio, no como validación. Constituyen evidencia indiciaria de que la bahía experimenta oscilaciones de largo período: los beach cusps son una expresión morfológica asociada a patrones de nodos y antinodos en la banda de infragravedad, y su persistencia entre 2010 y 2018 sugiere un forzante recurrente.

No se estableció una relación cuantitativa. Hacerlo habría requerido medir el espaciamiento de las formas y contrastarlo con la longitud de onda de borde subarmónica correspondiente a los períodos detectados, lo que excede el alcance declarado del estudio, donde se indica que no se estiman efectos sobre la morfología costera.

Cabe señalar que existe una hipótesis alternativa, la autoorganización del swash, que no requiere ondas de borde. El debate permanece abierto en la literatura.

En síntesis: la validación de los períodos se realizó por vía independiente: análisis espectral de campo contrastado con los modos del modelo numérico.

¿Qué mecanismo físico genera una oscilación de 512 segundos en la bahía?

Conviene distinguir dos cuestiones: qué frecuencia resuena y qué la excita. El estudio responde la primera. El modelo forzado con ruido blanco no supone ningún mecanismo generador: entrega energía uniforme en todas las frecuencias y es la geometría de la cuenca la que selecciona cuáles amplifica. El resultado establece que la bahía posee ese período natural, con independencia del forzante.

Respecto al mecanismo generador, el período de 512 segundos equivale a 8,5 minutos, fuera del rango típico del surf beat descrito por Munk. Según la literatura revisada, los candidatos plausibles son forzantes atmosféricas, como los frentes de presión documentados por Buchwald y Soeke (1973) e Hibiya y Kajiura (1982), y las ondas de borde atrapadas descritas por Yanuma y Tsuji y por Lemon et al.

En síntesis: determinar cuál mecanismo opera en Quintero requeriría correlacionar las series de elevación con registros barométricos y de viento.

ANEXOS DE RESPALDO

Modelación numérica

Configuración del modelo, condiciones de borde y validación de resultados

9 Elección del modelo de Boussinesq

11 Exclusión de términos disipativos

13 Truncamiento de la batimetría

15 Direccionalidad del forzante

17 Modos sin ajuste excelente

10 Capa de esponja y porosidad

12 Resolución de la malla

14 Duración de la simulación

16 Criterio de error y asignación

18 Implicancias para el puerto

¿Por qué se empleó un modelo de Boussinesq y no las ecuaciones de aguas someras?

Boussinesq es un modelo que resuelve la fase, condición indispensable para estudiar resonancia. El fenómeno surge de la interferencia entre ondas incidentes y reflejadas, y su representación requiere la elevación instantánea de la superficie libre, no una densidad de energía promediada como la que entregan los modelos espectrales.

Frente a las ecuaciones de aguas someras, que también resuelven la fase pero no son dispersivas, la ventaja está en el rango simulado. Al forzar el modelo con ruido blanco entre 30 y 1000 segundos se excitan simultáneamente componentes con longitudes de onda muy distintas.

Un modelo no dispersivo propagaría todas esas componentes a la misma celeridad, distorsionando la respuesta en el extremo de períodos cortos, donde con profundidades de hasta 60 metros ya no se cumple estrictamente el régimen somero. Boussinesq incorpora los términos dispersivos que corrigen ese comportamiento.

En síntesis: la distinción clave es entre modelos que resuelven la fase y modelos que la promedian: solo los primeros reproducen interferencia y resonancia.

¿Cómo se dimensionaron la capa de esponja y la capa de porosidad?

Para la capa de porosidad, MIKE recomienda un espesor total equivalente al 25 % de la longitud de onda a modelar. Considerando que la máxima separación entre ADCP es de unos 850 metros, el 25 % de esa distancia resulta en una capa de 250 metros, distribuida en 50 capas. Un criterio adicional fue dejar los equipos fuera de la capa para asegurar una extracción de datos válida.

El valor de porosidad adoptado es 0,95, representativo de valores de playa. El parámetro es adimensional y se mueve entre 0 y 1: valores cercanos a 1 corresponden a medios muy permeables con disipación moderada, y valores bajos a estructuras más reflectantes.

Para la capa de esponja se aplicaron espesores diferenciados: mayor en el sector sur del dominio, por no ser zona de interés ni contar con equipos, y menor en el sector norte, procurando no sobrepasar la posición de los ADCP para no perder

Datos de respaldo

0,95

porosidad adoptada

250 m

espesor de la capa

50 capas

discretización

En síntesis: ambas condiciones internas tienen por objeto absorber energía en los bordes y evitar reflexiones espurias hacia los puntos de extracción.

¿Por qué el modelo no incorpora fricción de fondo, viscosidad, rotura ni modulación mareal?

La primera razón es de estabilidad numérica. El esquema de Boussinesq es sensible a los gradientes de fricción entre celdas adyacentes, especialmente en zonas de pendiente pronunciada, donde la transición entre puntos de distinta rugosidad puede inducir inestabilidad. La estabilidad efectiva del modelo quedó verificada mediante el número de Courant y la simulación de prueba con espectro TMA.

La segunda es de orden metodológico. Los períodos propios de la cuenca dependen de su geometría; la disipación afecta la amplitud de la respuesta, pero no desplaza significativamente las frecuencias naturales. Excluirla permite que la respuesta resonante se manifieste con mayor claridad espectral.

La consecuencia debe explicitarse: las amplitudes obtenidas están sobreestimadas respecto a las reales.

Datos de respaldo

0,485

número de Courant

< 1

criterio de estabilidad

3 h

verificación TMA

En síntesis: el estudio identifica períodos resonantes, no alturas de agitación de diseño. Incorporar los términos disipativos queda propuesto como línea futura.

¿Se verificó que los resultados sean independientes de la resolución de la malla?

No se realizó un análisis formal de independencia de malla. La resolución de 5 metros se estableció verificando que resolviera adecuadamente la componente más corta del espectro simulado: para un período de 30 segundos en aguas someras, el espaciamiento adoptado entrega del orden de 40 puntos por longitud de onda, holgadamente por sobre el mínimo recomendado para esquemas de Boussinesq.

Conviene distinguir dos propiedades: la estabilidad numérica, verificada mediante el número de Courant y la simulación de prueba, y la independencia de malla, que es una verificación distinta y no se ejecutó.

La resolución adoptada además se sitúa en el límite práctico del dominio: refinar a 2,5 metros cuadruplicaría el número de celdas y obligaría a reducir el paso temporal para mantener el criterio de estabilidad.

Datos de respaldo

5 m
espaciamiento de grilla

1800 × 1300
puntos del dominio

≈ 40 pts / L
para T = 30 s

En síntesis: un estudio de convergencia de malla queda propuesto como línea futura para cuantificar la sensibilidad de los períodos a la discretización.

¿Qué efecto tiene truncar la batimetría en 60 metros de profundidad?

La transformación significativa de las ondas largas, esto es la refracción y el shoaling, ocurre al ingresar a la plataforma somera, no en aguas profundas donde la celeridad se mantiene prácticamente constante. Truncar el dominio en 60 metros conserva dentro de él toda la zona donde la batimetría modifica efectivamente la propagación.

Existe además una razón asociada al esquema: la formulación de Boussinesq tiene límites de validez en la razón entre profundidad y longitud de onda, y los gradientes batimétricos pronunciados del talud comprometen la estabilidad numérica. Acotar el dominio mantiene el modelo dentro de su rango de aplicabilidad.

La consecuencia es que el modelo no representa la propagación desde aguas profundas: ese tramo queda absorbido en la condición de borde, donde el forzante se impone directamente.

En síntesis: el dominio se acotó entre 5 y 60 metros respetando las profundidades de todos los puntos de medición.

¿Son suficientes 180 minutos de simulación para resolver los modos resonantes?

El tiempo se definió para asegurar un número suficiente de ciclos del modo dominante. Con 180 minutos de simulación y un período de 512 segundos, la corrida abarca más de 20 ciclos completos, lo que permite que la resonancia se establezca y que el análisis espectral resuelva el peak con claridad. Para los modos de menor período la cobertura es considerablemente mayor.

La verificación de que el tiempo es adecuado es empírica: la simulación de prueba con espectro TMA muestra que la altura de ola se estabiliza en los cuatro nodos antes de la corrida definitiva.

En el extremo superior del rango forzado la resolución se degrada, pero ello no compromete los resultados: el modo más largo identificado es de 512 segundos y ninguna conclusión depende de esa zona del espectro.

Datos de respaldo

10 800 s

duración total

21 ciclos

para $T = 512$ s

0,1 s

paso temporal

En síntesis: no existe un número universal de ciclos: depende del amortiguamiento del sistema y del objetivo, que aquí es identificar frecuencias, no amplitudes.

¿Por qué se usó espectro direccional en las mediciones y no en el modelo?

La direccionalidad cumple funciones distintas en cada enfoque. En el análisis instrumental es indispensable: el método bayesiano utiliza las diferencias de fase entre transductores para reconstruir la componente direccional, y sin ello no sería posible discriminar las ondas largas del ruido en el registro.

En el modelo el objetivo es otro: identificar las frecuencias propias de la cuenca. Esos períodos son una propiedad geométrica del dominio y no dependen de la dirección de incidencia. La dirección afecta con qué intensidad se excita cada modo y cómo se distribuye espacialmente la energía, pero no desplaza las frecuencias naturales.

El forzante se impuso unidireccional, con el dominio rotado 45 grados respecto al norte para alinearlo con la dirección predominante del oleaje incidente registrada en los equipos, que fue del oeste.

En síntesis: la comparación entre ambos enfoques se realiza sobre períodos, que es la variable que uno y otro determinan de forma independiente.

¿De dónde proviene el criterio de error y cómo se asignó cada modo a su contraparte?

El criterio se definió para este trabajo, al no disponerse de un estándar establecido para clasificar la concordancia entre modos resonantes modelados y medidos. Los umbrales no son arbitrarios: se fundamentan en la resolución espectral del análisis instrumental.

Las líneas espectrales consecutivas se separan cerca de un 9 % en la banda donde se concentran los modos validados. El umbral de 3 % queda por debajo de esa separación, lo que garantiza que un modo clasificado como concordante apunta inequívocamente a una línea y no admite confusión con la vecina.

Ese mismo fundamento sustenta la asignación. Tomando el caso de 51,68 segundos del modelo: la diferencia con 51,20 es de 0,48 segundos, mientras que con las líneas vecinas supera los 5 segundos, un orden de magnitud mayor.

Candidato	Distancia
51,20 s	0,48 s
46,55 s	5,13 s
56,89 s	5,21 s

En síntesis: el criterio de clasificación y el de asignación son el mismo, lo que da coherencia al esquema de validación.

De los 12 modos obtenidos, solo 3 presentan ajuste excelente. ¿Qué ocurre con los restantes?

Los doce modos tienen correspondencia instrumental. Tres presentan ajuste excelente, con error inferior al 1 %, y los restantes se sitúan dentro de la categoría de buena concordancia, bajo el 3 %. Ninguno quedó sin contraparte.

En términos absolutos, un error del 2 % sobre un período de 35 segundos equivale a menos de un segundo de diferencia.

El origen de la discrepancia es identificable: los períodos obtenidos de las mediciones corresponden a líneas discretas de la FFT, mientras que el modelo entrega valores continuos. La diferencia refleja la resolución espectral del análisis instrumental y no un desajuste físico entre ambos métodos.

Modelo	Campo	Error
64,00	64,00	0,00 %
512,48	512,00	0,09 %
51,68	51,20	0,93 %
168,91	170,67	1,04 %
84,02	85,33	1,56 %

En síntesis: que el modelo no caiga exactamente sobre las líneas de la FFT es esperable, precisamente porque no comparte esa grilla de frecuencias.

¿Puede atribuirse a estas ondas los incidentes de corte de espías en el Puerto de Ventanas?

No es posible establecer causalidad. El objetivo del estudio fue identificar la presencia de ondas largas y determinar los períodos resonantes de la bahía, no evaluar la respuesta de naves amarradas.

Los incidentes se presentan como motivación del problema: evidencian que existen condiciones de agitación que afectan la operación portuaria, y las ondas largas constituyen uno de los mecanismos capaces de generarlas, junto a otros como el oleaje operacional, el viento o el paso de naves.

Atribuir esos casos específicos a los períodos identificados requeriría información no disponible en este trabajo: condiciones oceanográficas en las fechas de los eventos, características de las naves involucradas, configuración de los sistemas de amarre y un análisis de respuesta dinámica del conjunto.

Alcance: el aporte del estudio es la caracterización de los períodos propios de la bahía, insumo necesario para un estudio específico de agitación operacional.