XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA
SIOP 2026

Modelo físico 3D para el estudio de la agitación en la dársena de la caleta de pescadores artesanales en sector Roca a la Baja, Valparaíso

Eduardo González P.

RESUMEN

El presente estudio evalúa el comportamiento hidrodinámico y la propagación del oleaje en la situación base de la nueva caleta de pescadores artesanales proyectada en el sector Roca a la Baja, Valparaíso, mediante un modelo físico 3D a escala 1:67.7 construido en el Instituto Nacional de Hidráulica (INH). Para caracterizar la respuesta del sistema, se procesaron registros de la superficie libre obtenidos en múltiples sondas, implementando un enfoque dual que combinó el análisis en el dominio de la frecuencia con el análisis en el dominio del tiempo. Los resultados demuestran que, si bien la zona exterior mantiene un comportamiento lineal predecible en la atenuación del oleaje, la zona de la futura dársena experimenta una reducción efectiva de la energía incidente, aunque con una marcada variabilidad espacial y frecuencial. Asimismo, la comparación entre ambos métodos evidencia una divergencia en ambientes someros debido a las transformaciones no lineales del oleaje, subrayando la necesidad de emplear parámetros estadísticos para el diseño. Finalmente, los mapas operativos de agitación revelan que la transmisión de energía hacia la zona protegida futura está fuertemente gobernada por la frecuencia del oleaje. Actualmente se encuentra en desarrollo la fase correspondiente a las obras proyectadas, las cuales serán incorporadas a este documento una vez culminadas las etapas de modelación física y procesamiento de datos.

Palabras clave: agitación portuaria, modelo físico 3D, coeficiente de agitación, análisis espectral, semejanza de Froude, caleta de pescadores artesanales.

Instituto Nacional de Hidráulica (INH), Chile — correo: eduardogonzalez@inh.cl

1 INTRODUCCIÓN

La Dirección de Obras Portuarias (DOP) ha encargado el estudio "Modelo físico 2D y 3D para el diseño de la caleta de pescadores artesanales en el sector Roca a la Baja de Valparaíso", que forma parte del diseño de la nueva caleta de pesca artesanal destinada a los pescadores de la ex caleta Sudamericana. El proyecto contempla un molo de abrigo en escollera que busca dar abrigo a una dársena interior para el embarque y desembarque en buenas condiciones, junto con una explanada mitad piloteada y mitad sobre relleno controlado, sitios de atraque para embarcaciones menores y lanchas de pesca artesanal, y edificaciones de servicio. El lugar de emplazamiento se ubica en el extremo sur de la caleta El Membrillo, en el sector Plaza la Hélice de la avenida Altamirano, caracterizado por un borde costero rocoso con afloramientos como el de Roca a la Baja (Figura 1).

Figura 1: Ubicación de las obras de la nueva caleta en el sector Roca a la Baja, Valparaíso.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño de la obra fue desarrollado por la DOP mediante formulaciones empíricas y modelaciones numéricas de propagación de oleaje. Con el propósito de verificar y optimizar el diseño interno, evaluar la agitación al interior del área abrigada y cuantificar el sobrepaso hacia la dársena, se planteó una campaña de modelación física bidimensional (2D) y tridimensional (3D). El modelo 3D tiene como objetivo general optimizar la sección del molo de abrigo y las condiciones de operación de la dársena, evaluando la agitación al interior del área abrigada, los efectos de las obras en sectores adyacentes y el sobrepaso hacia la dársena.

Cabe señalar que el alcance de este documento se centra exclusivamente en el análisis de la situación base. En la actualidad, se encuentra en desarrollo la fase de experimentación correspondiente a las obras proyectadas, cuyos resultados e impactos hidrodinámicos serán incorporados y discutidos en futuras actualizaciones a este documento, una vez culminada la modelación física.

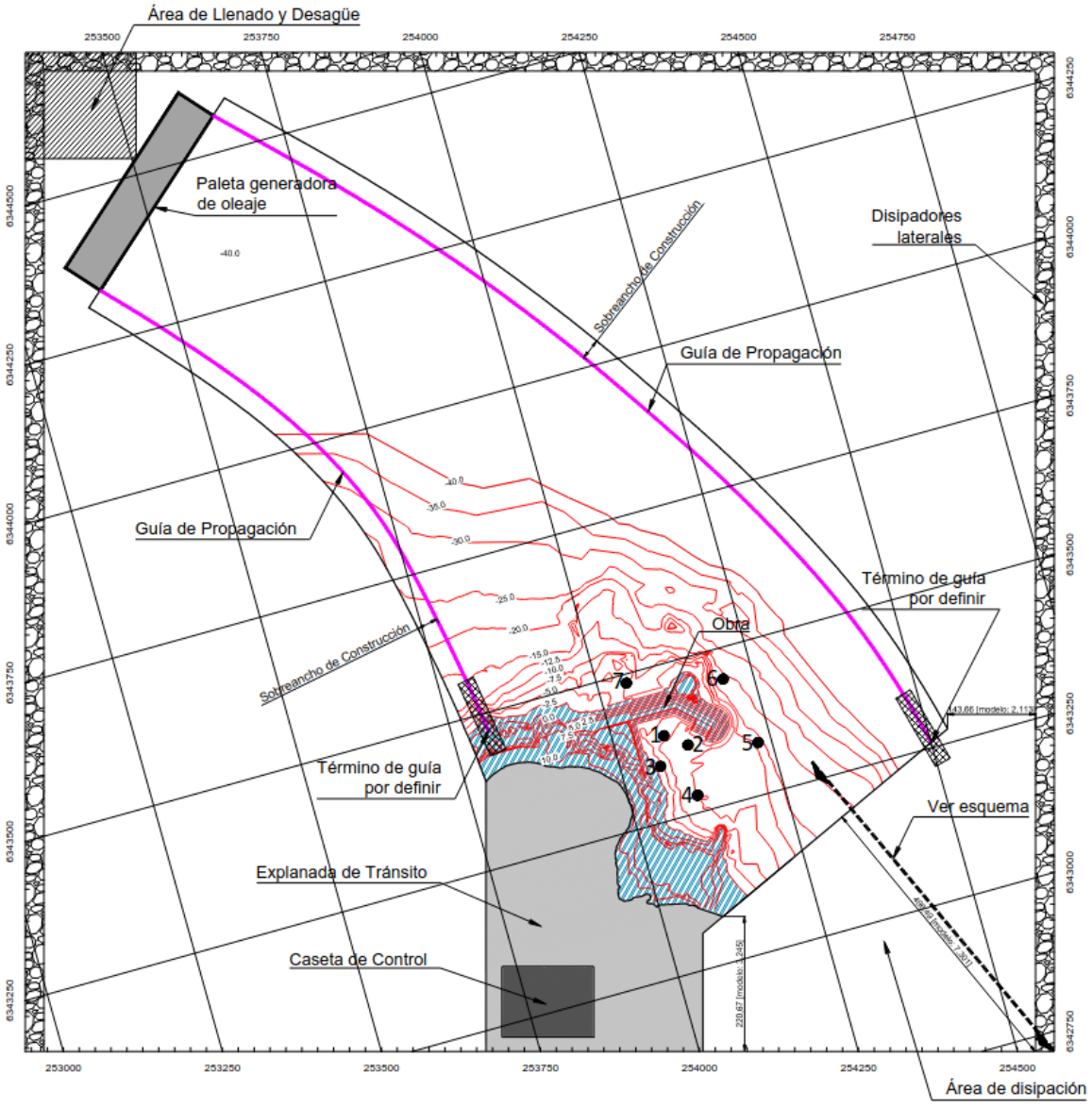
2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO 3D

2.1 Consideraciones del proyecto modelo

La escala geométrica del modelo físico se fijó en 1:67.7, con semejanza de Froude, sin distorsión y con lecho fijo. Esta escala permite estudiar la agitación en la zona de abrigo y es coherente con los límites operacionales del tanque y del generador de oleaje (Hughes, 1993; Frostick et al., 2011). El modelo se construyó en un estanque de 24 m de ancho por 25 m de largo y muros de 1 m de altura. La topo-batimetría se representó desde la cota -35 m hasta +5 m, con veriles cada 2.5 m y mayor detalle en las zonas de cambios bruscos y afloramientos rocosos. La profundidad se truncó a -35 m por limitaciones del área disponible, de la profundidad de generación (0.6 m) y del frente de la paleta (5.5 m); los procesos de propagación para esta configuración se verificaron previamente con modelaciones numéricas Boussinesq (FUNWAVE-TVD, Shi et al., 2012), que mostraron diferencias menores a 0.1 m al interior de la dársena respecto de batimetrías no truncadas.

La dirección de propagación de los ensayos es la indicada por el mandante, con frente proveniente desde 315° (NNW). Para canalizar la energía desde la paleta hacia la zona de estudio se diseñaron guías de propagación a partir de la propagación espectral de oleaje; en el contorno del estanque se instalaron disipadores de oleaje y no se incluyó el molo del puerto de Valparaíso, cuya influencia resultó inferior a 0.1 m en la agitación interior según los análisis numéricos previos. La obra de abrigo se representó con núcleo, filtro y coraza de elementos de protección tipo dolo de 7.5, 13.5 y 16 t, reproducidos geométricamente y fijados para impedir su deformación durante los ensayos; al interior de la dársena se representaron los pilotes y muros de los sitios de atraque. En la Figura 2 se presenta el esquema del proyecto modelo y en la Figura 3 una vista general del modelo construido.

Figura 2: Esquema del proyecto modelo físico 3D.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3: Vista general del modelo físico construido en el INH.



Fuente: Elaboración propia.

2.2 Instrumentación

El oleaje fue generado mediante una paleta servoeléctrica de 5.5 m de longitud, fabricada por DHI y operada a través del software *Wave Synthesizer*, el cual permite reproducir condiciones de oleaje irregulares (espectro JONSWAP). Las series de tiempo de la elevación de la superficie libre se registraron utilizando ocho sondas resistivas DHI, las cuales fueron previamente calibradas en el laboratorio para transformar la señal de voltaje en altura de agua.

La distribución espacial de la instrumentación se diseñó con el propósito de capturar la variabilidad de la agitación dentro del área abrigada. En concreto, cinco sondas se distribuyeron al interior de la dársena para caracterizar la hidrodinámica en los sectores de atraque; dos sondas se alinearon en la dirección de propagación, frente a la ubicación del rompeolas, para cuantificar los efectos de refracción asociados a la obra; y, finalmente, la sonda de referencia (S9) se instaló en aguas profundas, próxima a la paleta, para registrar el oleaje incidente.

3 CONDICIONES DE ENSAYO

La campaña experimental contempló la generación de oleaje irregular basado en un espectro JONSWAP, con una dirección de incidencia de 315°. Las condiciones de ensayo abarcaron alturas espectrales de ola en la paleta (H_{m0}) comprendidas entre 1.0 y 4.0 m, y períodos peak (T_p) de entre 12 y 18 s, siendo estos valores representativos de las condiciones de diseño del sector de estudio. Los ensayos se llevaron a cabo bajo diferentes escenarios hidrodinámicos, considerando niveles de marea entre 0.0 y 2.5 m NRS. En total, se ejecutaron y validaron 54 ensayos. La Tabla 1 resume el número de pruebas realizadas para cada combinación de altura y período.

Tabla 1: Número de ensayos por combinación de altura y período de la paleta.

H (m)	T=12 s	T=14 s	T=16 s	T=18 s
1.0	2	2	2	2
1.5	2	2	2	2
2.0	3	3	3	3
3.0	3	3	3	3
3.5	1	1	1	1
4.0	2	3	3	2

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que, actualmente, los resultados expuestos en esta sección corresponden a la caracterización de las condiciones base (estado sin proyecto). Los ensayos físicos que incorporan el diseño de las obras de abrigo se encuentran en proceso de ejecución. Conforme progresen las etapas de revisión y se aproxime la fecha de presentación, este documento se actualizará para integrar los nuevos ensayos y la evaluación hidrodinámica con las estructuras proyectadas.

4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

El procesamiento de las series de tiempo de la elevación de la superficie libre se abordó mediante un análisis dual, evaluando el oleaje tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.

Inicialmente, en el dominio de la frecuencia, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando el método de promediado de Welch. Esto permitió estimar la función de densidad espectral de energía, $S(f)$, para cada ensayo y sonda. A partir de estos espectros, se calcularon los parámetros característicos del oleaje: la altura de ola espectral (H_{m0}) y el período pico (T_p). La altura espectral se obtuvo mediante la relación $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, donde m_0 representa el momento de orden cero del espectro. Considerando que el modelo físico opera bajo la ley de similitud de

Froude, los tiempos y las cinemáticas registradas se llevaron a escala de prototipo aplicando el factor de escala correspondiente.

Dado que la estimación de la altura espectral asume teóricamente que las alturas de ola siguen una distribución probabilística de Rayleigh, se incorporó un análisis complementario en el dominio del tiempo. En aguas someras y al interior de la dársena, los procesos de asomeramiento, difracción y reflexión inducidos por el rompeolas introducen no linealidades que alejan al oleaje de este supuesto teórico lineal. Para capturar la geometría real del oleaje, se implementó el método de cruce por cero descendente (*Zero-Downcrossing*) sobre las series temporales, permitiendo individualizar cada onda. Mediante este conteo ola a ola, se calcularon parámetros estadísticos directos, destacando la altura de ola significativa ($H_{1/3}$), definida como la altura media del tercio de olas más altas, y la altura máxima absoluta (H_{max}).

Finalmente, para evaluar la atenuación del oleaje en su propagación desde aguas profundas hacia el interior de la dársena, se definió el coeficiente de agitación local (K_a). Este parámetro se calculó como la razón entre la altura de ola registrada en una sonda específica y la medida en la sonda de referencia incidente, expresado de forma general como $K_a = H_{local}/H_{incidente}$. Con el fin de representar adecuadamente tanto la disipación de la varianza espacial como la deformación geométrica, este coeficiente se evaluó comparativamente empleando tanto los parámetros espectrales ($K_a = H_{m0,local}/H_{m0,S9}$) como los estadísticos ($K_a = H_{1/3,local}/H_{1/3,S9}$). Este coeficiente cuantifica la agitación relativa en cada punto del área abrigada; valores de $K_a < 1$ indican una atenuación efectiva de la energía del oleaje incidente, condición de diseño exigida en los sectores de atraque protegidos por el rompeolas.

El análisis se divide en dos fases: la situación base (sin proyecto) y la situación con obras. Esto permitirá evaluar los efectos directos de las obras de abrigo y la atenuación del oleaje generada por las mismas.

5 RESULTADOS

5.1 Análisis espectral — Situación base

La Figura 4 muestra los espectros de energía del ensayo representativo T0038 ($H = 3.0$ m, $T = 14.0$ s). Se aprecia una marcada reducción de la altura de ola entre la referencia S9 (ubicada en aguas profundas) y las sondas interiores, acompañada de una atenuación general de la energía y de un desplazamiento de esta hacia frecuencias ligeramente superiores en el interior de la dársena. Este ensanchamiento y desplazamiento de los picos espectrales (*peaks*) es consistente con los procesos de asomeramiento, difracción, los cuales inducen transferencias no lineales de energía entre las diferentes componentes frecuenciales.

5.2 Análisis global de la agitación y coeficiente de atenuación (K_a) — Situación base

Para evaluar el desempeño global del área de estudio en situación sin obra, se analizó la dispersión de las alturas de ola locales respecto a la condición incidente ($S9$) tanto en la zona de propagación exterior (sondas $S1$ y $S2$) como al interior de la dársena (sondas $S3$ a $S7$) (Figura 6):

- **Zona de propagación exterior (sondas S1 y S2):** A partir de los resultados obtenidos se aprecia que en estas zonas exteriores los coeficientes de agitación presentan un comportamiento lineal en función del aumento de la altura en la paleta. Se obtuvieron coeficientes de atenuación promedio de 0.35 y 0.52, calculados tanto mediante el método de cruces por cero como por el método espectral, no apreciándose en esta zona efectos importantes del período sobre los coeficientes de agitación.

- **Al interior de la dársena (sondas S3 a S7):** Para las sondas $S3$, $S4$, $S5$ y $S6$, la relación lineal entre la altura de oleaje en la sonda de control cercana a la paleta y la altura local experimenta modificaciones; los valores presentan mayor dispersión y coeficientes de agitación más altos son asociados a los períodos mayores. Por su parte, en la sonda $S7$ los valores presentan menor dispersión en torno a los períodos, encontrándose más agrupados con un K_a aproximado de 0.52 para $H_{1/3}$ y de 0.45 para H_{m0}.

5.3 Efecto de las no linealidades: Aproximación espectral vs. Estadística

Al contrastar los resultados obtenidos mediante el análisis espectral (H_{m0}) y el análisis ola a ola ($H_{1/3}$), se evidencia el impacto de las transformaciones no lineales propias de la propagación en aguas someras. Mientras que en la zona de propagación exterior ambos parámetros mantienen una relación cercana que valida el supuesto de la distribución de Rayleigh en aguas profundas, en zonas más someras los valores tienden a mostrar mayores variaciones.

La altura espectral tiende a diferir de la altura significativa estadística debido a la asimetría geométrica (crestas peraltadas y senos aplanados) inducida por el asomeramiento y la difracción. Esta divergencia subraya la importancia de emplear el parámetro estadístico ($H_{1/3}$) para una caracterización más realista de las condiciones de diseño, superando las limitaciones teóricas del momento de orden cero (m_0) en ambientes no lineales.

5.4 Mapas de agitación en futura dársena (Heatmaps) – Situación base

La Figura 5 muestra los mapas de agitación para las sondas ubicadas en la zona que será protegida por las obras ($S4$, $S5$, $S6$ y $S7$), evaluando el coeficiente de agitación (K_a) en función de la variación conjunta del período incidente (T_p) y la altura de ola incidente (H_{m0}). A partir de la

distribución de los valores en las matrices, se identifican los siguientes patrones de comportamiento hidrodinámico:

- **Sensibilidad al período (Efecto del Swell):** En todas las sondas evaluadas se observa un gradiente horizontal de color. A medida que el período incidente aumenta desde los 12.0 s hasta los 18.0 s, los valores de K_a experimentan un incremento, alcanzando sus máximos registros a los 18.0 s. Este comportamiento confirma que la energía asociada a olas de mayor período se propaga con mayor energía hacia la zona de la futura dársena debido a los fenómenos de difracción y asomeramiento.

- **Comportamiento diferencial por sonda:** Las Sondas S4 y S6 presentan los valores más elevados de agitación en todo el sector correspondiente a la zona abrigada posterior a las obras. La Sonda $S4$ registra coeficientes que varían entre 0.46 y hasta 0.96 para el período de 18.0 s, mientras que la Sonda $S6$ oscila entre 0.39 y 0.74, lo que denota una zona más energética frente a las condiciones de oleaje incidente.

  Por el contrario, las Sondas S5 y S7 exhiben una atenuación más eficiente y homogénea. En particular, ambas muestran los coeficientes más moderados y estables frente a las variaciones de altura y período, manteniendo la mayor parte de sus registros por debajo de 0.52.

- **Influencia de la altura incidente:** A diferencia del período, las variaciones en la altura de ola incidente (H_{m0}, dispuesta en el eje vertical) muestran un impacto menos pronunciado sobre el coeficiente K_a en términos relativos, evidenciando que el comportamiento de transmisión y agitación al interior de la dársena está fuertemente gobernado por la frecuencia del oleaje incidente más que por su altura inicial.

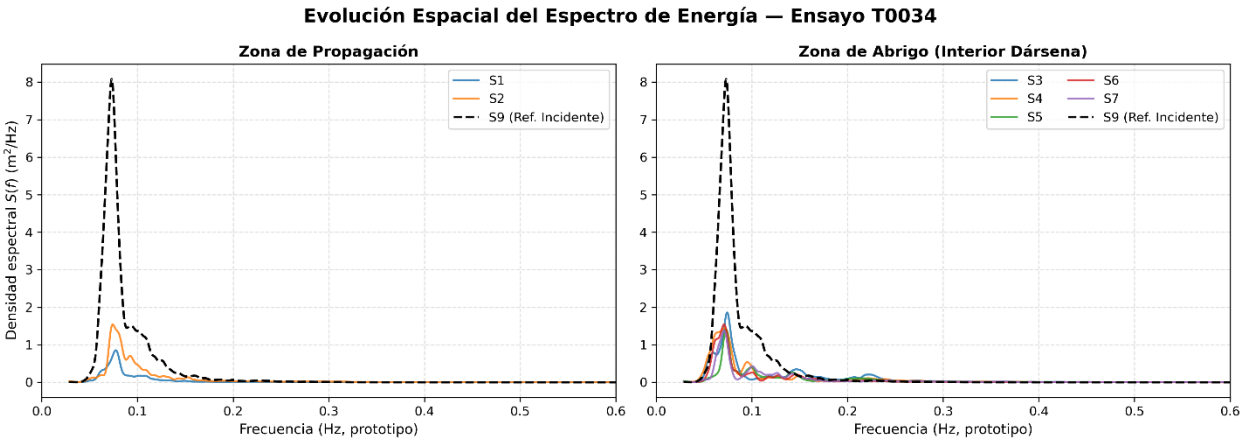


Figura 4: Espectros de energía del ensayo T0034 (Hmo: 2.0 m Tp:14 s).

Fuente: Elaboración propia.

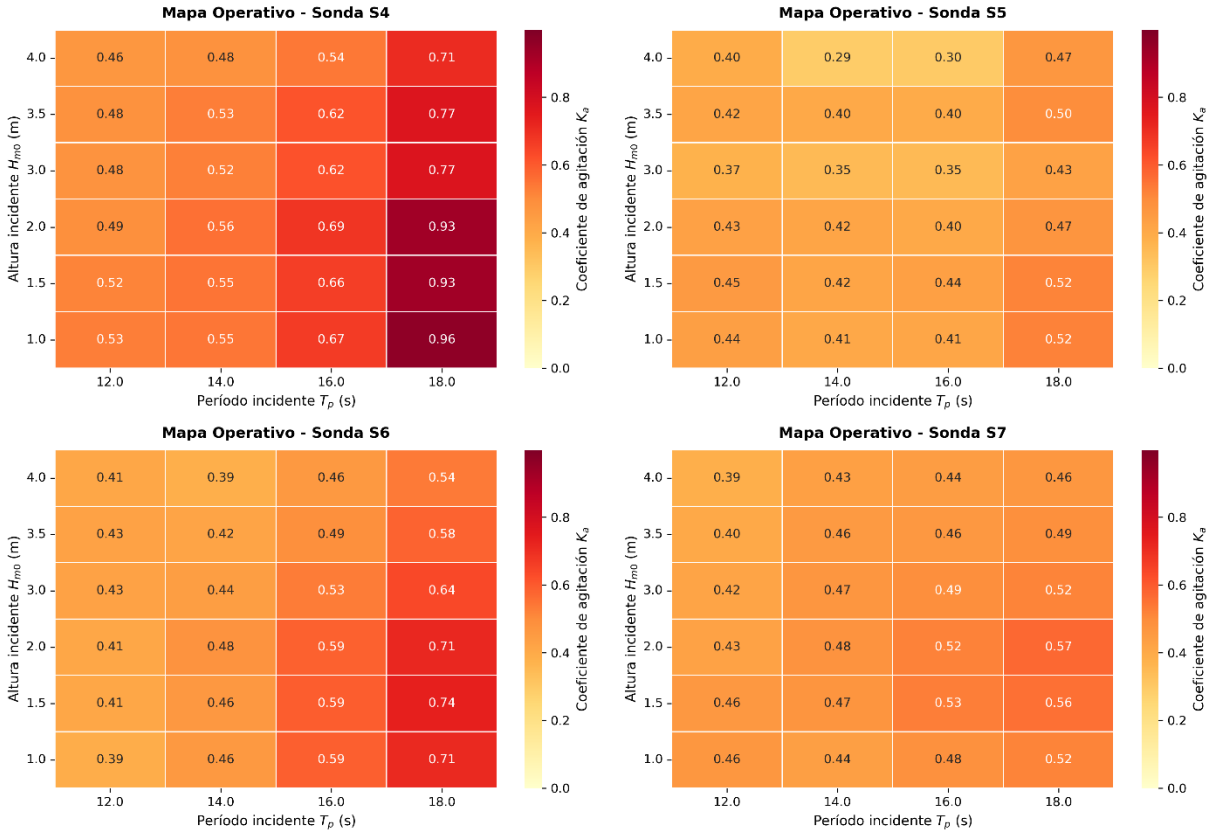


Figura 5: Series de tiempo del ensayo T0038 (H=3 m, T=14 s).

Fuente: Elaboración propia.

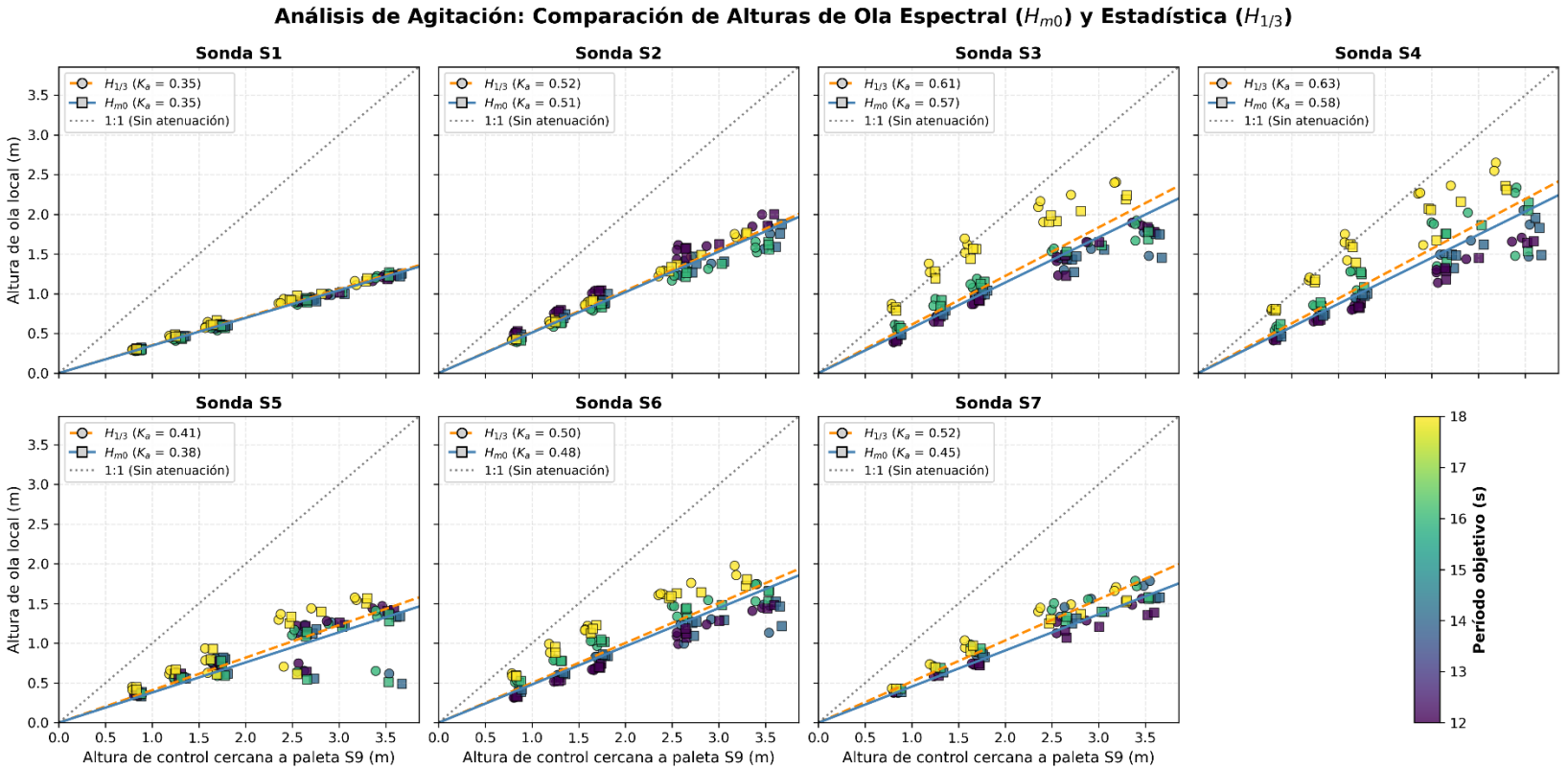


Figura 6: Verificación del oleaje generado: Hm0 medido vs. altura de la paleta.

Fuente: Elaboración propia.

6 CONCLUSIONES

A partir de la evaluación experimental del modelo físico 3D a escala 1:67.7 construido en el INH, el cual permitió analizar la situación base de la nueva caleta de pescadores artesanales del sector Roca a la Baja de Valparaíso, y del procesamiento de los registros de oleaje, tanto en el dominio de la frecuencia como del tiempo, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

- **Desempeño global y atenuación hidrodinámica:** Los coeficientes de agitación (K_a) confirmaron que la zona de propagación exterior ($S1$ y $S2$) presenta un comportamiento lineal predecible respecto al oleaje incidente, sin disipación prematura. La principal conclusión para la futura zona de abrigo es que actualmente la atenuación de la energía se produce de manera exclusiva por los procesos de interacción del oleaje con el fondo marino (asomeramiento, refracción y difracción). Por lo tanto, es esperable que dentro de la dársena el oleaje se atenúe aún más, presentando una marcada variabilidad espacial y frecuencial. En particular, las sondas $S5$ y $S7$ demostraron ser las zonas más protegidas y estables (registrando valores de K_a mayoritariamente inferiores a 0.52), mientras que $S4$ y $S6$ concentraron los niveles de agitación más elevados.

- **Efecto de las transformaciones no lineales y filtrado por frecuencia:** La comparación entre la altura espectral (H_{m0}) y el análisis ola a ola ($H_{1/3}$) demostró que los supuestos teóricos de la distribución de Rayleigh pierden validez en aguas someras. Dado que el asomeramiento y la difracción generan asimetrías geométricas en las olas, se requiere emplear parámetros estadísticos obtenidos por cruce por cero para lograr estimaciones de diseño más realistas en estructuras interiores. Por otra parte, los mapas operativos de agitación revelaron que la transmisión de energía hacia el interior de la dársena está fuertemente gobernada por la frecuencia del oleaje incidente más que por su altura inicial.

Cabe señalar que el alcance de la presente evaluación mediante modelo físico 3D se centró exclusivamente en el análisis de la situación base. En la actualidad, se encuentra en desarrollo la fase de experimentación correspondiente a las obras proyectadas, cuyos resultados e impactos hidrodinámicos serán incorporados y discutidos en futuras actualizaciones a este documento, una vez culminada la modelación física.

7 REFERENCIAS

Frostick, L.E., McLelland, S.J. y Mercer, T.G. (eds.) (2011). Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. CRC Press, Boca Raton.

Hughes, S.A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7. World Scientific, Singapur.

Hughes, S.A., Cohen, J. y Acuff, H.A. (2008). Physical Model Study of Wave Action in New Thomsen Harbor, Sitka, Alaska. Coastal and Hydraulics Laboratory, US Army Corps of Engineers.

Le Méhauté, B. (1976). An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves. Springer-Verlag, Nueva York.

Shi, F., Kirby, J.T., Harris, J.C., Geiman, J.D. y Grilli, S.T. (2012). A high-order adaptive time-stepping TVD solver for the Boussinesq modeling of nearshore hydrodynamics. Coastal Engineering, 60, 351-366.