

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

PRONÓSTICO OPERACIONAL DE OLEAJE PARA LAS COSTAS Y PUERTOS DE CHILE

CRISTIAN PARRA M.¹
JOSÉ BEYÁ M.²

RESUMEN

En Chile, el pronóstico general marítimo oficial es generado por el Servicio Meteorológico de la Armada, el cual es limitado ya que tiene un horizonte de solo 12 horas y no proporciona información exacta respecto a la evolución horaria de las alturas de ola, periodos de oleaje y dirección de oleaje. El presente trabajo detalla metodología y validación de un Sistema de Pronóstico Operacional de Oleaje, que se desarrolló en el marco del proyecto Fondef-Idea IT13120006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” utilizando los vientos operacionales de NOAA y el modelo Wavewatch III v4.18.

Los pronósticos son de libre acceso y están disponibles en www.oleaje.uv.cl. Estos son actualizados 4 veces por día, donde se muestran parámetros estadísticos del oleaje cada 3 horas para los próximos 7 días. Los datos se muestran en ubicaciones de aguas profundas a lo largo de todo el borde costero de Chile, y en aguas intermedias, frente a la entrada de los puertos principales

¹ Memorista proyecto Fondef-Idea IT13120006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, Egresado de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María – cristian.parra.m@gmail.com

² Director proyecto Fondef- Idea IT13120006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”, Académico Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso – jose.beya@uv.cl

1 INTRODUCCION

El interés principal de la meteorología marina ha sido principalmente el tránsito de los buques por alta mar en condiciones de seguridad, sin embargo, los servicios meteorológicos también han adquirido una importancia creciente en los puertos y áreas portuarias (Puelma, 2015). Esto se debe a que muchas de las actividades portuarias son sensibles al estado meteoceanográfico donde el oleaje es el factor de mayor relevancia en las operaciones, dada la condición de costa abierta que poseen la mayoría de los puertos de Chile.

El Pronóstico General Marítimo emitido periódicamente por el Servicio Meteorológico de la Armada es la información oficial que determina el cese o apertura de las actividades en puertos y costas. Sin embargo, éste es bastante limitado ya que es de carácter cualitativo, y se indica en un horizonte temporal de solo 12 horas.

Hoy en Chile existen sistemas de predicción de oleaje, pero estos son de carácter privado y de alto costo para los usuarios (*e.g.*, PRDW, Puelma (2015)., SIPROL® - Hidalgo (2017)). El sistema de pronóstico de PRDW consiste en la aplicación de modelos globales de oleaje en combinación con una técnica simplificada de propagación de oleaje, para luego aplicar una corrección en los distintos puertos del país.

También existen sistemas de predicción de oleaje como Windguru (www.windguru.cz) que presenta una mejor visualización de los pronósticos de NOAA³, pero estos no presentan información en aguas someras frente a las costas de Chile.

El pronóstico operacional que se presenta en este trabajo, utiliza como información de entrada los campos de vientos del Sistema de Pronóstico Global (GFS) de NOAA. El modelo GFS se actualiza cuatro veces por día y ofrece predicciones de los próximos 7 días (192 horas).

Se compararon estadígrafos de validación de los pronósticos de NOAA versus estadígrafos de validación de los pronósticos presentados en este trabajo.

Beyá *et al.* (2017) realizaron una calibración del modelo Wavewatch III v.4.18 para el proyecto Fondef IDeA IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” donde establecieron recomendaciones sobre el uso de del modelo para las costas de Chile. El modelo configurado para este proyecto formó la base sobre la cual se realizó el sistema de pronóstico operacional que se describe en este documento y que formó parte del proyecto antes mencionado.

En este trabajo se describe la metodología que permitió, realizar y validar un sistema automático de pronóstico de oleaje en 79 nodos a lo largo de todo el borde costero y un pronóstico de oleaje de aguas intermedias en la boca de los puertos más importantes del país. Los resultados se obtienen a través de estados de mar representados por espectros bidimensionales, cada tres horas, y en un horizonte temporal de 7 días. Estos resultados son procesados, publicados, y actualizados 4 veces al día de forma automática en la página web www.oleaje.uv.cl/pronostico.html.

³ National Oceanic and Atmospheric Administration – EE.UU.

2 METODOLOGIA

Forzante del modelo

Para el pronóstico de oleaje se utiliza el modelo de tercera generación WAVEWATCH III v4.18 (WW3 de aquí en adelante). La configuración del modelo se definió a partir del trabajo realizado en el proyecto "Un Atlas de Oleaje para Chile" donde se realizó una calibración del modelo y se encontró que la configuración de Ardhuin *et al.* (2011) entrega resultados adecuados para las costas de Chile utilizando las forzantes de viento de NOAA. El modelo consta de una malla de cálculo de $1^\circ \times 1^\circ$ de resolución, acotada entre las longitudes 110° Este - 60° Oeste y las latitudes 65° Norte - 65° Sur. WW3 resuelve la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje [1] aplicada a un espectro definido en el espacio $X=(x,y)$, el tiempo t , el vector número de onda $k=(k_x, k_y)$ y la dirección θ (Tolman, 2014).

$$\frac{\partial N(k, \theta, X, t)}{\partial t} + \nabla_x (C_g + U)N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N(k, \theta, X, t) + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N(k, \theta, X, t) = \frac{S_t(k, \theta, X, t)}{\sigma} \quad [1]$$

Donde, C_g es la velocidad de grupo, U es la velocidad de la corriente promediada en la vertical y en el tiempo, las variables \dot{k} y $\dot{\theta}$ son las tasas de variación de densidad de acción de oleaje al interior del espectro en los dominios de la frecuencia y la dirección, inducidos por efectos batimétricos e interacción ola-corriente.

La forzante corresponde a los campos de vientos a 10 metros de altura a los cuales se accede a través de NOAA (<ftp://ftp.prdd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/wave/prod>). Poseen una resolución de $1^\circ \times 1,25^\circ$ (longitud y latitud respectivamente), que deben ser interpolados para obtener una malla de $1^\circ \times 1^\circ$ coincidente con la resolución del modelo WW3 utilizado en este trabajo. La dimensión de la malla de cálculo cubre el área entre 78° N y 78° S, con 288 puntos en la dirección N-S, y 157 puntos en la dirección E-O generando un total de 45.216 puntos en la malla. Los campos contienen datos en intervalos de 3 horas, con un total de 61 estados de viento para los 7 días de pronóstico.

Ejecución de WW3

La ejecución del modelo se realiza en el clúster de servidores de CIMFAV⁴-ICO⁵ utilizando 8 núcleos de los 100 disponibles.

WW3 permite dos modos de partida, el modo "Cold Start" y el modo "Restart". El primero corresponde a la condición de partida con aguas en reposo $N(x,y,t=0)$ donde los resultados tardan alrededor de 6 días en independizarse de ésta. El modo "Restart" consiste en generar una condición inicial para la próxima simulación con valores de energía espectral en todo el dominio.

En la Figura 1 se presenta una comparación de un pronóstico en modo "Cold start" y una segunda curva la cual corresponde a un pronóstico en modo "Restart" ejecutado 6 días posterior al modo

⁴ Centro de Investigación y Modelación de Fenómenos Aleatorios de la Universidad de Valparaíso

⁵ Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso

Cold start. El lapso de 6 días en que el modelo genera resultados fiables, se atribuye principalmente a la celeridad de la ola y la distancia que debe recorrer desde su origen hasta las costas de Chile (oleaje generado en el pacifico sur). Si el oleaje fuera inducido por el pacifico norte, el tiempo en generar resultados fiables puede llegar a 15 días.

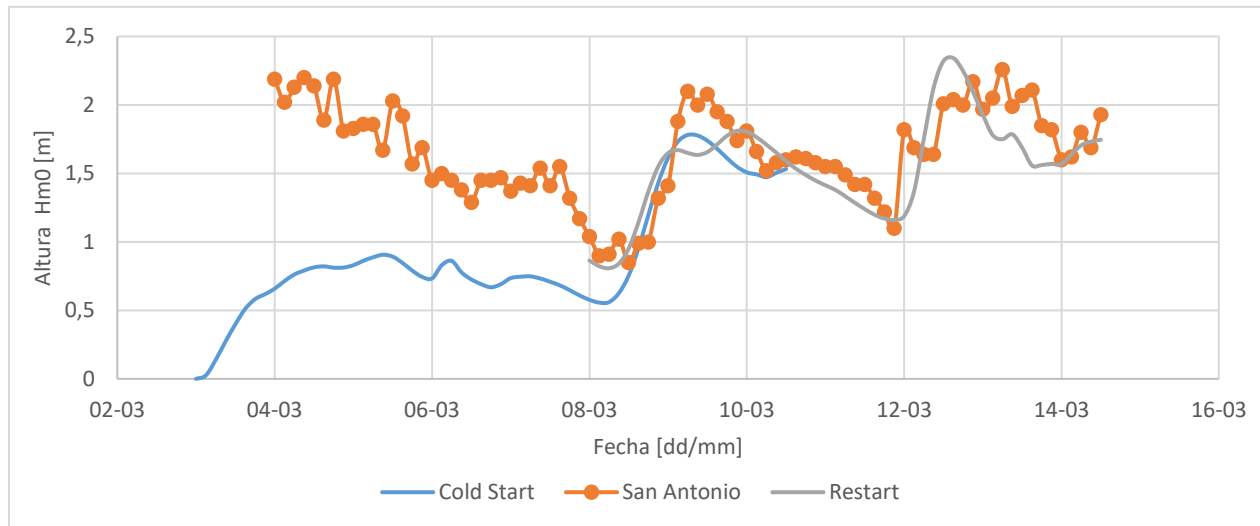


Figura 1: Pronóstico de altura H_{m0} [m] en modo Cold Start (Línea azul), modo Restart (línea gris) y datos registrados por ADCP San Antonio (Línea anaranjada).

En el modo “Restart” la condición inicial consiste en un archivo llamado restart.wv3, que produce como salida el modelo WW3. Si éste archivo no está disponible, el modelo se iniciará automáticamente con condiciones de calma (*i.e.*, $H_{m0}=0$). Una vez obtenido el archivo de condición inicial, es necesario tener una condición que permita la continuidad entre los pronósticos que se realizan diariamente. Para esto se configura el modelo, con la finalidad de que se guarden las condiciones iniciales del respectivo pronóstico, para permitir a futuro, la continuidad entre el pronóstico de oleaje del presente y el del día anterior.

El sistema de pronóstico desarrollado se ejecuta en el modo “Restart”. Sin embargo, cuando hay algún inconveniente como corte de luz o alguna otra falla que detenga el proceso por más de 24 horas, el sistema se reinicia automáticamente en modo “Cold Start” generando pronósticos de mala calidad hasta que los resultados nuevamente se independicen de la condición inicial unos 6 días después (Figura 1).

El modelo se ejecuta todos los días y cuatro veces por día. Cada ejecución diaria (02, 08, 14 y 20 horas UTC -4) se realiza de forma separada con el fin de que los procesos se realicen de forma independiente y no se mezclen entre ellos. Cada pronóstico de 7 días se ejecuta en el clúster, con un total de 8 núcleos, lo que toma un tiempo de cálculo de 20 minutos aproximadamente.

Una vez que el modelo WW3 se ha ejecutado por completo, es necesario descargar los datos desde el clúster para llevarlos a un formato que permita realizar los post procesos, ya que los archivos de salida del modelo son en formato netCDF.

Se generan resultados puntuales correspondientes a espectros bidimensionales en un total de 79 ubicaciones a lo largo de todo el borde costero de Chile y resultados en aguas someras para 9 puertos de Chile. Además se generan campos de H_{m0} , T_p y D_p en todo el dominio de modelación del Océano Pacífico. En la Tabla 1 se presenta la ubicación exacta donde se realizan los pronósticos para los puertos.

Tabla 1: Listado de los nueve puertos estatales utilizados para realizar el Pronóstico de Oleaje en aguas someras.

Nombre	Latitud	Longitud
Arica	-18.467401°	-70.325324°
Iquique	-20.199319°	-70.154746°
Mejillones	-23.055385°	-70.395957°
Antofagasta	-23.645528°	-70.407681°
Coquimbo	-29.942276°	-70.942276°
Quintero	-32.758346°	-71.503488°
Valparaíso	-33.032413°	-71.614554°
San Antonio	-33.588096°	-71.627131°
Talcahuano	-36.740345°	-73.155275°

Los resultados son transferidos desde el clúster al computador de escritorio donde se realiza el post proceso con el software GNU Octave. A partir de los espectros bidimensionales y a través de los parámetros estadísticos de Altura significativa (H_{m0}), Periodo medio (T_m), Periodo pico (T_p), Dirección media (D_m) y Dirección pico (D_p) utilizados en el Atlas de oleaje (Beya et al., 2016), se obtienen y generan las gráficas que son posteriormente actualizadas en el servidor en el que se aloja el sitio web (www.oleaje.uv.cl/pronostico).

Con respecto a los espectros, estos se convierten desde un formato netCDF a un formato .MAT, se calculan los parámetros estadísticos del oleaje y posteriormente se genera un archivo de extensión .TXT para cada nodo. La información se almacena para un posible uso posterior. Este archivo contiene H_{m0} , T_p , T_m , T_e , D_p y D_m para una ventana de 7 días y cada 3 horas.

Propagación de oleaje hacia aguas intermedias

Dado que WW3 fue configurado con una malla de una resolución demasiado gruesa como para obtener resultados en aguas intermedias, es necesario realizar una propagación de oleaje adicional para obtener pronósticos frente a la boca de los puertos principales de Chile. Si bien esto es posible realizarlo con WW3 utilizando técnicas de anidado o mallas no estructuradas (e.g. Mediavilla & Hito, 2016), para evitar gastos computacionales, esfuerzo de aprendizaje e investigación adicional, se decidió utilizar la metodología abreviada de propagación de oleaje de Domínguez (2011) que ya era conocida por el equipo de trabajo del proyecto.

Esta metodología abreviada consiste en propagar espectros sintéticos de oleaje de altura de ola unitaria, abarcando la mayor cantidad de combinaciones posibles entre, direcciones que van desde los 180° hasta 360°, y 28 casos de frecuencia. Estas combinaciones se propagaron de forma independiente en el modelo de ola de tercera generación SWAN v41.1, desde aguas profundas

hacia la costa, y luego, con los resultados, se reconstruyeron los espectros completos en el sitio de interés asumiendo superposición lineal de las componentes del oleaje. Esta metodología produce resultados prácticamente idénticos a los de una propagación de oleaje directa (Gallardo, 2015).

Automatización del Pronóstico de oleaje

Para automatizar el pronóstico, se crearon 7 códigos los cuales fueron programados en lenguaje bash. En la Tabla 2 se presentan los códigos en orden cronológico de acuerdo a su ejecución y participación dentro del sistema de pronósticos. Con esto es posible lograr que los pronósticos se generen de forma completamente automática, solo basta con tener el computador de escritorio encendido en los horarios que se ejecuta el sistema de pronóstico de oleaje.

Tabla 2: Numeración y descripción de la función de los códigos del Pronóstico de Oleaje.

N°	Nombre	Función
1	START	<ul style="list-style-type: none"> Ejecuta todos los otros códigos (N°2 al N°7) en un determinado orden, con el objetivo de automatizar el pronóstico de oleaje.
2	S01	<ul style="list-style-type: none"> Ejecuta el código que descarga la forzante. Sube la forzante (en formato GRIB2) al servidor para posteriormente ser convertida a formato netCDF. Ejecuta el comando “ncl_convert2nc” en el servidor. Descarga al computador la forzante en extensión netCDF. Ejecuta el código de Octave que configura el formato de la forzante para que pueda ser leído por WW3.
3	S02	<ul style="list-style-type: none"> Ejecuta los códigos de Octave que configuran las fechas en que se realizara el pronóstico de oleaje. Sube las configuraciones de fechas actualizadas al clúster. Sube el archivo restart.ww3 del pronóstico de oleaje del día anterior. Ejecuta e inicia el modelo WW3.
4	S03	<ul style="list-style-type: none"> Descarga los campos de altura, periodo y dirección. Descarga los espectros de los 79 nodos. Ejecuta los códigos de Octave que procesan los espectros. Ejecuta el código de Octave que procesa los Campos. Descarga el archivo restart.ww3 del pronóstico actualizado.
5	Plot1	<ul style="list-style-type: none"> Ejecuta el código de Octave que genera las imágenes presentadas en la página web. Sube las imágenes actualizadas al servidor de la página web.

6	Propaga	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecuta el código de propagación de Octave para cada puerto respectivamente. • Ejecuta el código que genera las imágenes de los pronósticos propagados de cada puerto. • Sube los archivos de las imágenes actualizadas al servidor de la página web.
7	Plot2 (gif)	<ul style="list-style-type: none"> • Copia el Campo de altura de ola. • Ejecuta el código de Octave que genera 61 imágenes correspondientes a los 61 estados de mar. • Crea una animación de la variación del campo H_{m0} utilizando las 61 imágenes • Sube la animación actualizada al servidor del sitio web.

3 RESULTADOS

Validación en aguas profundas

Dado que no se cuenta con mediciones actuales de oleaje en aguas profundas que permitan validar el pronóstico, se compararon las alturas significativas del pronóstico con los datos publicados por Windguru que corresponden al pronóstico de oleaje operacional NOAA. En las Figuras 2 y 3 se presentan las series de tiempo de dos semanas no consecutivas. En la Tabla 3 se presentan los resultados de los estadígrafos de medición de error empleados para dichas semanas. Los estadígrafos están calculados según las formulaciones indicadas por Beyá *et al.* (2016a) y Beyá *et al.* (2016b)

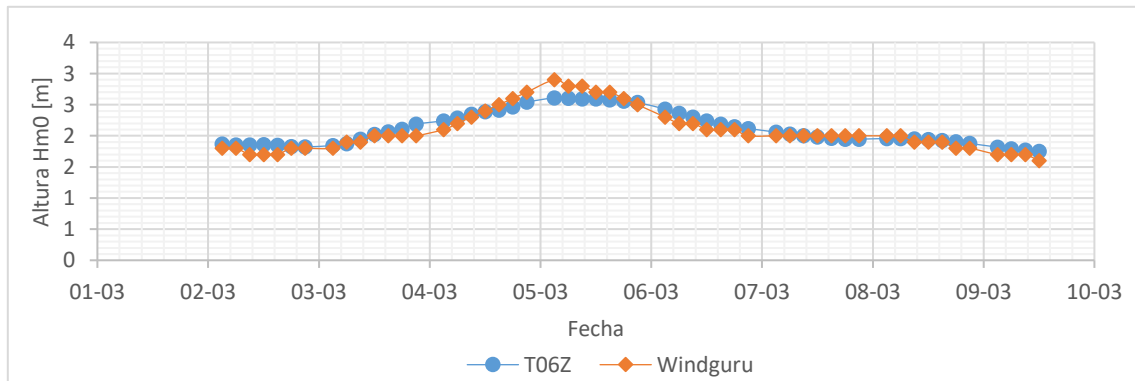


Figura 2: Serie de tiempo para H_{m0} modelada (línea azul) y H_{m0} publicada por el sitio web Windguru (línea naranja). Semana 1.

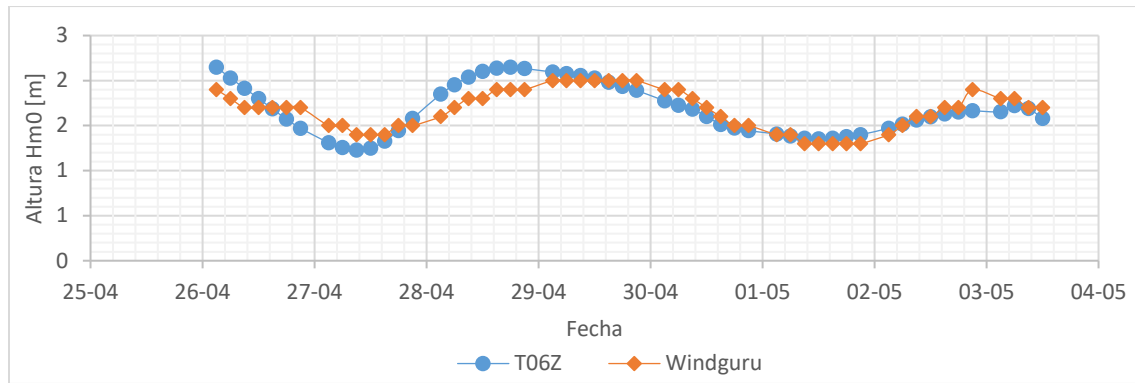


Figura 3: Serie de tiempo para H_{m0} modelada (línea azul) y H_{m0} publicada por el sitio web Windguru (línea naranja). Semana 2.

Tabla 3: Resultados de los estadígrafos utilizados para altura H_{m0} en aguas profundas.

ESTADÍSTICOS H_{m0}	Semana 1	Semana 2
RMSE	0,11	0,14
Habilidad de pronóstico (SS)	0,95	0,91
Promedio H_{m0} Windguru	2,09	1,67
Promedio H_{m0} Pronóstico	2,11	1,68
Error Absoluto medio (MAE)	0,09	0,12
Sesgo (BIAS)	-0,03	-0,01
R^2	0,85	0,75
Promedio error relativo	-0,02	0,00
Mínimo error relativo	-0,10	-0,17
Máximo error relativo	0,10	0,16
Promedio error relativo absoluto	0,04	0,07
Mínimo error relativo absoluto	0,00	0,00
Máximo error relativo absoluto	0,10	0,17

Para ambos casos se obtuvieron coeficientes de determinación superior a $R^2 = 0.73$. De acuerdo a lo observado, las alturas significativas espectrales presentan una sobrestimación por parte del modelo, y errores absolutos relativos entre un 0% y 17%, obteniendo un promedio de 4% para la semana 1 y un 7% para la semana 2. El error absoluto medio es de 0.11 [m] aproximadamente para ambas semanas.

Se utilizaron datos de la validación del sistema de pronóstico de NOAA, los cuales pertenecen a aguas profundas frente a la costa oeste de Alaska. El desempeño es menor a los pronósticos generados en este trabajo, ya que la validación de NOAA tiene un sesgo entre 0.09 y 0.2 [m] contra un sesgo de 0.02 [m], un RMSE entre 0.24 y 0.4 [m] contra un RMSE de 0.13 [m], y correlaciones entre 0.79 y 0.88 para NOAA versus una correlación de 0.8 para los datos presentados en este trabajo.

Validación en aguas intermedias

El pronóstico en aguas intermedias se pudo validar en un punto gracias a las mediciones en tiempo real de libre acceso de Puerto San Antonio (<http://www.epsa.cl:9090/>). En las Figuras 4 y

5 se presenta una comparación de las series de tiempo de H_{m0} , T_p y D_p versus las mediciones del puerto. Se eligió una semana de oleaje poco energético y otra semana donde hubo marejada.

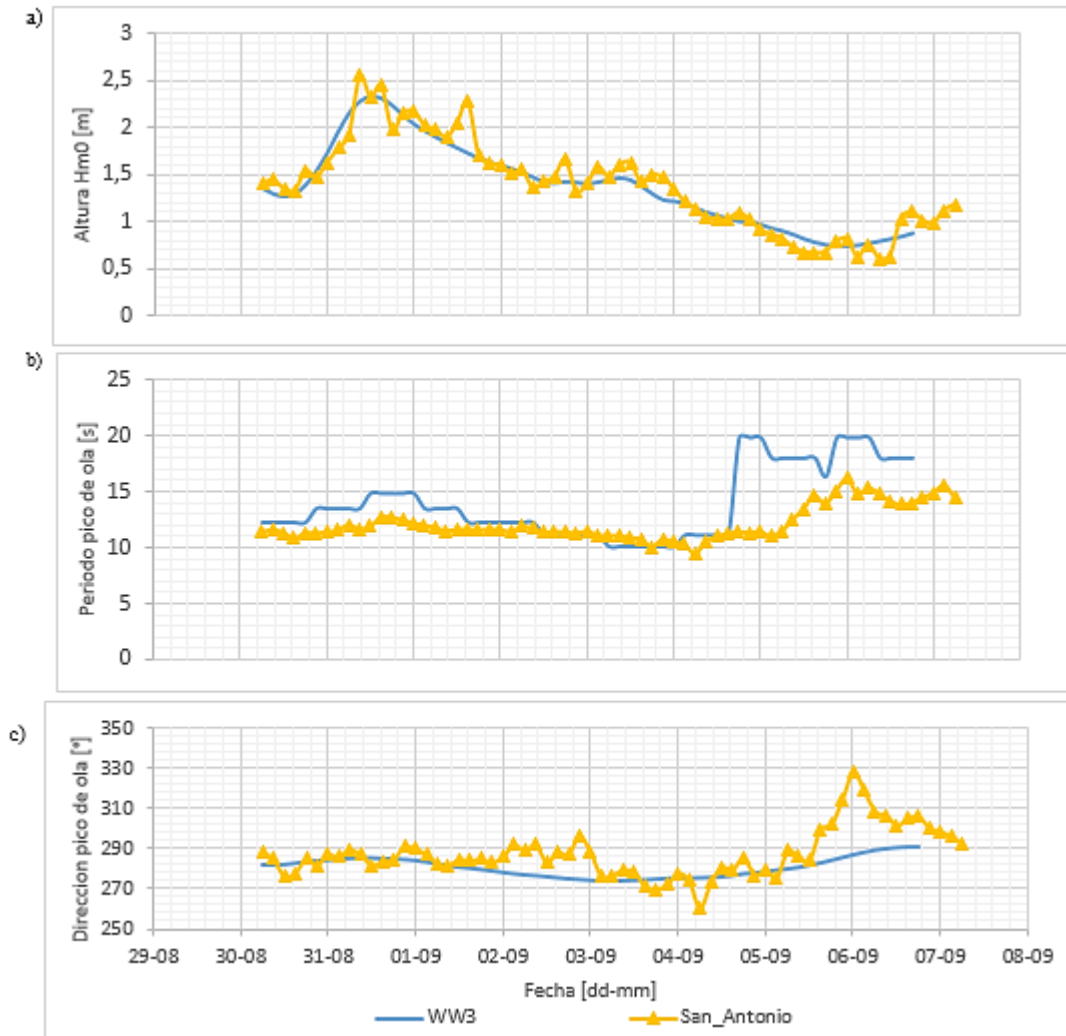


Figura 4: **a)** Serie de tiempo para H_{m0} modelada (línea azul) y H_{m0} registrada por el ADCP del puerto de San Antonio (línea amarilla con triángulos). **b)** Serie de tiempo para T_p modelado (línea azul) y T_p registrados por el ADCP del puerto de San Antonio (línea amarilla con triángulos). **c)** Serie de tiempo para Direcciones pico [°] modelada y Direcciones pico [°] registrados por el ADCP del puerto de San Antonio. Semana con oleaje poco energético.

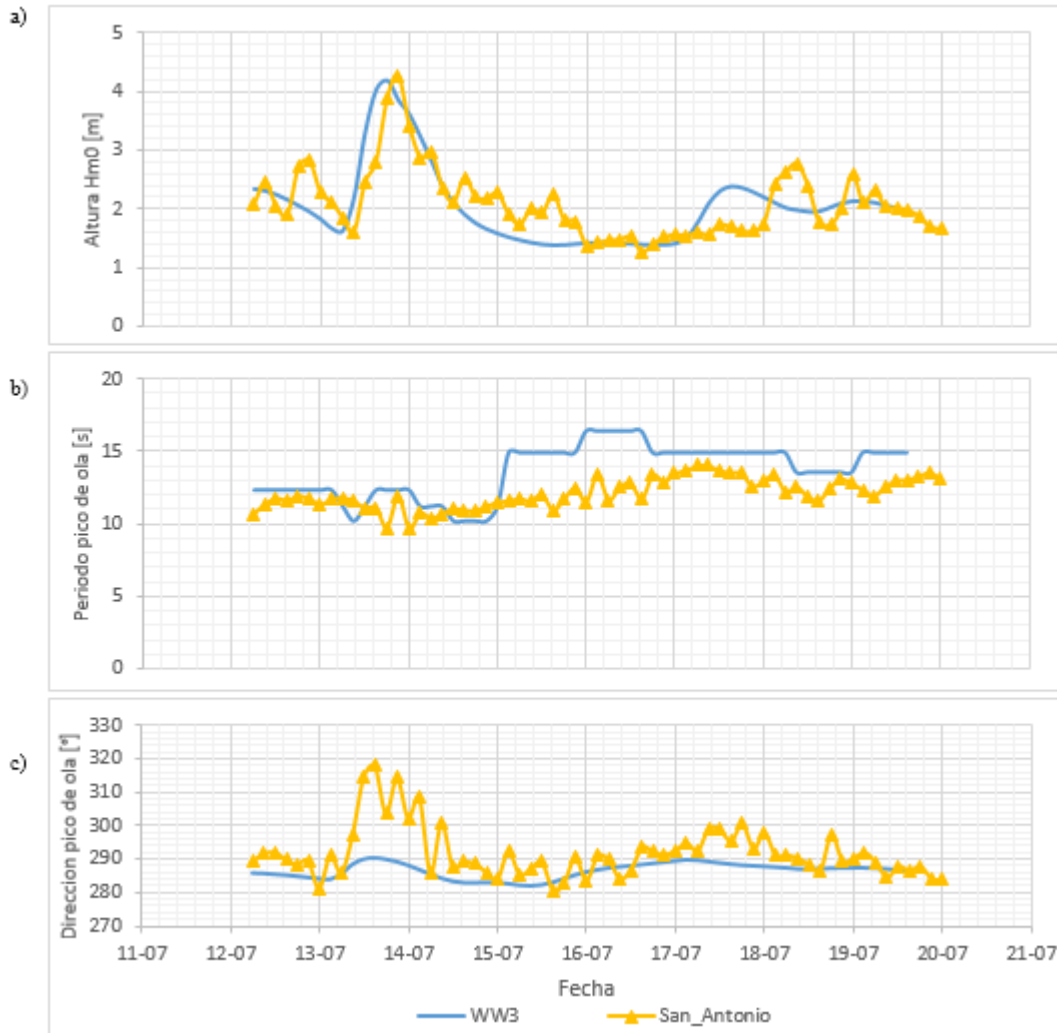


Figura 5: **a)** Serie de tiempo para H_{m0} modelada (línea azul) y H_{m0} registrada por el ADCP del puerto de San Antonio (línea amarilla con triángulos). **b)** Serie de tiempo para T_p modelado (línea azul) y T_p registrados por el ADCP del puerto de San Antonio (línea amarilla con triángulos). **c)** Serie de tiempo para Direcciones pico $[\text{°}]$ modelada y Direcciones pico $[\text{°}]$ registrados por el ADCP del puerto de San Antonio. Semana donde hubo marejada.

En la Figura 6 se presenta la dispersión de las 4 semanas utilizadas para validar los pronósticos de oleaje, mientras que en la Figura 7 se presenta la dispersión del total de las alturas significativas pronosticadas. En la Tabla 4 se presentan los resultados de los estadígrafos calculados para los datos de pronóstico respecto a 4 semanas consecutivas, estadígrafos del sistema de pronóstico de SIPROL® y del sistema de pronóstico de PRDW.



Figura 6: a) Serie de tiempo para H_{m0} modelada (punto azul) y H_{m0} registrada por el ADCP del puerto de San Antonio (triángulos naranjos). b) Serie de tiempo para T_p modelado (punto azul) y T_p registrados por el ADCP del puerto de San Antonio (triángulos naranjos). c) Serie de tiempo para Direcciones pico [°] modelada (punto azul) y Direcciones pico [°] registrados por el ADCP del puerto de San Antonio (triángulos naranjos).

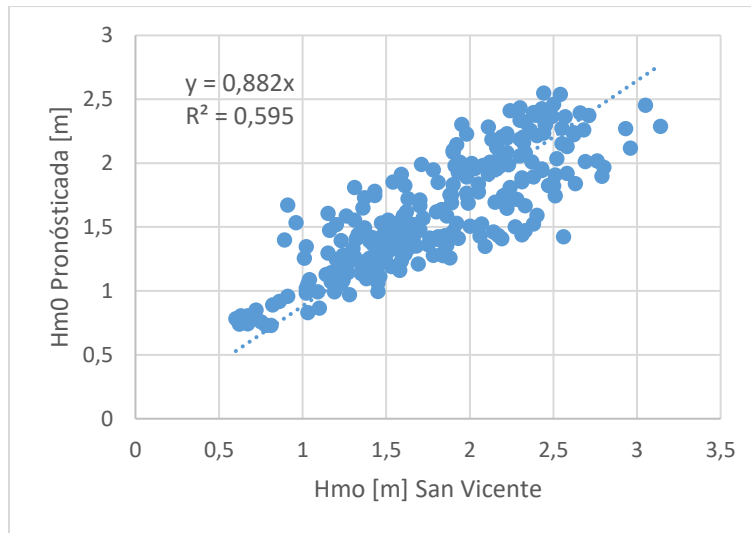


Figura 7: Hm0 pronosticada versus Hm0 Terminal marítimo San Antonio.

Tabla N°4: Resumen de estadígrafos para aguas intermedias.

Estadísticos	H_{m0} [m]	T_P [s]	D_P [°]	H_{m0} [m] NOAA	H_{m0} [m] PRDW	H_{m0} [m] SIPROL
RMSE	0,34	2,43	7,64	[0.31 – 0.41]		0.75
Habilidad de pronóstico (SS)	0,82	0,8	0,97			
Promedio Hm0 San Antonio	1,76	11,79	288,44			
Promedio Hm0 Pronóstico	1,67	13,71	284,26			
Error Absoluto medio (MAE)	0,26	1,89	5,57			
Sesgo (BIAS)	0,09	-1,73	4,15	[0.10 - 0.21]		0.26
R^2	0.60	0.45	-4.11	[0.81 – 0.87]	[0.59 – 0.8]	0.60
Promedio error relativo	0,04	-0,14	0,01			
Mínimo error relativo	-2,4	-8,07	-0,1			
Máximo error relativo	0,44	0,14	0,12			
Promedio error relativo absoluto	0,15	0,16	0,02			
Mínimo error relativo absoluto	0	0	0			
Máximo error relativo absoluto	1,46	0,75	0,12			

De acuerdo a lo observado, las alturas significativas modeladas presentan una subestimación con respecto a las alturas significativas registradas por el ADCP.

Para H_{m0} , se obtuvo un error relativo absoluto promedio del 15% y un promedio del error relativo del 4% indicando una leve subestimación. Esto concuerda parcialmente con Beyá *et al.* (2016a) quienes estimaron la incertidumbre en propagaciones de oleaje hacia aguas intermedias en la costa de Chile central y encontraron errores absolutos relativos promedio similares, pero con una tendencia a la sobrestimación.

Los pronósticos de H_{m0} que genera NOAA en aguas intermedias, tienen un desempeño muy cercano a los pronósticos generados en este trabajo, ya que NOAA tiene un sesgo entre 0.10 y 0.21 [m] contra un 0.09 [m], un RMSE entre 0.31 y 0.41 [m] contra un 0.34 [m], y una correlación entre 0.85 y 0.87 versus una correlación de 0.60 para los resultados presentados en este trabajo.

Para el caso de estadígrafos de error presentados por SIPROL®, se observa que el sistema de pronóstico presentado obtiene mejor desempeño obteniendo un RMSE de 0.34 versus un RMSE 0.75 para el pronóstico de SIPROL®, un sesgo de 0.09 contra un sesgo de 0.26 para SIPROL®, y una correlación de 0.6 ambos sistemas de pronóstico.

Con respecto a R^2 , se obtuvo un valor mejor a los obtenidos por el sistema de PRDW, el cual tiene valores entre 0.40 y 0.60 para sus pronósticos (sin corregir) en aguas intermedias en los puertos de Ventanas, Quintero y en Terminales marítimos como San Vicente, Patache y Esperanza, mientras que en este trabajo se obtuvo un $R^2=0.6$ para el puerto estatal de San Antonio.

Para el periodo pico, el modelo los sobreestima con respecto a la medición de Puerto San Antonio. Se obtuvo un error relativo absoluto promedio de 16% y un error relativo promedio de -14% lo que indica una tendencia a la sobreestimación por parte del modelo. La tendencia a la sobreestimación es similar a los resultados de Beyá *et al.* (2016a), sin embargo, los errores son bastante menores incluso considerando que ellos compararon otro parámetro estadístico del período ($T_{-1,0}$) que normalmente tiene un mejor ajuste a los modelos que el período pico.

Con respecto a las validaciones de NOAA, se obtuvieron valores muy cercano para T_p , ya que NOAA tiene un sesgo entre 0.62 y 1.13 [s] contra un 1.79 [s] para los resultados presentados en este trabajo, un RMSE entre 1.79 y 2.28 [s] contra un 2.43 [s], y un R^2 entre 0.5 y 0.75 versus un $R^2=0.45$ para los datos presentados en este trabajo.

Con respecto a los coeficientes de determinación, para el período pico se obtuvieron valores menores que los obtenidos para el caso de las alturas significativas, ya que el máximo coeficiente presentado es de 0.52. Esto es esperable ya que normalmente el ajuste de los períodos es peor que el de la altura significativa (*e.g.*, Beyá *et al.*, 2017, Beyá *et al.*, 2016a, Beyá *et al.*, 2016b).

Para el caso de las direcciones pico se observa que el modelo subestima los valores con respecto a las registradas por el ADCP del puerto de San Antonio. El error relativo absoluto promedio es de 2%. Se obtuvo un sesgo máximo de 7° aproximadamente, lo que es bastante bajo considerando que los errores en aguas profundas pueden ser mayores (hasta 14° según Gallardo & Álvarez, 2016). Esto se debe a que en la propagación hacia aguas intermedias debido a la refracción, el oleaje proveniente de distintas direcciones tiende a orientarse hacia un rango de direcciones más acotado y perpendicular a los veriles.

No fue posible realizar una comparación más a fondo para las direcciones, debido a que NOAA, PRDW y SIPROL® no entregan información y tampoco realizan ningún tipo de validación respecto a este parámetro.

El sistema de pronóstico presentó un buen desempeño al momento de pronosticar fuertes marejadas, lo cual queda demostrado con el pronóstico de oleaje para la semana del 12-07-2016 (Figura 5), donde el modelo fue capaz de pronosticar la marejada con 7 días de anticipación, obteniendo un coeficiente de determinación de 0.55.

CONCLUSIONES

Gracias a la utilización de los datos publicados por el sitio web Windguru (aguas profundas) y los datos registrados por el ADCP en el puerto de San Antonio (aguas intermedias), fue posible realizar una validación del modelo automático de pronósticos de oleaje. Esta validación se utilizó para comparar y generar una discusión sobre el desempeño del sistema automático de pronóstico de oleaje, frente a otros sistemas existentes en Chile como lo son PRDW y SIPROL®, en donde se evidenció la eficiencia del sistema presentado, ya que los errores son menores y/o cercanos a los errores de los sistemas de carácter privado mencionados anteriormente.

Además de lograr generar un sistema automático de pronóstico operacional de oleaje que tiene un buen desempeño en comparación a otros pronósticos realizados para Chile, se logró comparar los resultados de los estadígrafos respecto a estudios anteriores sobre la incertidumbre en la propagación del oleaje (Beyá *et al.*, 2016a).

En la actualidad, el sistema de pronóstico de oleaje tiene un funcionamiento automático. Diariamente se generan 4 pronósticos de oleaje sin supervisión humana, obteniéndose resultados para aguas profundas a lo largo de todo Chile y en aguas intermedias en las entradas de los puertos principales. Los pronósticos son publicados diariamente y están disponibles en www.oleaje.uv.cl/pronostico.html, y la información pronosticada es archivada para su futuro uso.

REFERENCIAS

Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queffelec, P., Obrebski, M. (2011). Calibration of the "IOWAGA" global wave hindcast (1991-2011) using ECMWF and CFSR Winds. In: 12th International Workshop in Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai'i, pp. 1-13.

Beyá, J., Gallardo, A., Lucero, F., Catalán, P. y Puelma, A. 2016a. Incertidumbre en la estimación de la altura significativa espectral y el período energético en el modelado de propagación de oleaje - caso región de Valparaíso. Obras y Proyectos 19, 24-32.

Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. 2016b. Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.

Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Winckler P. 2017. Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling* 116 (2017) 16–32, Virtual Special Issue – COWCLIP, Elsevier.

Dominguez J. 2011. Analysis of spectral wave energy transfer methodologies from deep to shallow water. Trabajo de título, Pontificia Universidad Católica de Chile. 24-40.pp.

Gallardo & Álvarez. 2016. Calibración del modelo Wavewatch III. Informe Técnico 02, UN ATLAS DE OLEAJE PARA CHILE, disponible en www.oleaje.uv.cl.

Gallardo A. 2015. “Calibración y validación del modelo STWAVE mediante mediciones y modelación matemática en un sector ubicado en la región de Valparaíso”. Memoria de Título, Universidad de Valparaíso, pp. 7-8.

Mediavilla & Hito 2016. Nearshore assessment of wave energy resources in central Chile (2009-2010). *Renewable Energy* 90:136-144.

Puelma, A. 2015. Propagación pseudo-espectral del oleaje y sistema automatizado de pronóstico de oleaje local. Valparaíso: Tesis para optar al título de Ingeniero Civil.

Tolman, H. L. 2014. User Manual and System Documentation of WaveWatch III, version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.

Hidalgo H. 2017. Desempeño de la herramienta tecnológica SIPROL® en el pronóstico de marejadas, años 2015 y 2016 Quinta Región. Informe técnico versión 170203_v03, disponible en <http://siprol.com/index4.html>