

# Sistema de simulación numérica para la costa de Chile central mediante el acoplamiento de modelos numéricos

Numerical simulation system for the coast of central Chile by coupling numerical models

Fecha de envío: 30 de octubre 2022

Fecha de aceptación: 13 de marzo 2023

Sergio Bahamóndez<sup>1,2</sup> y Catalina Aguirre<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile, [sergio.bahamondez@alumnos.uv.cl](mailto:sergio.bahamondez@alumnos.uv.cl), [catalina.aguirre@uv.cl](mailto:catalina.aguirre@uv.cl)

<sup>2</sup> Centro de la Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Santiago, Chile

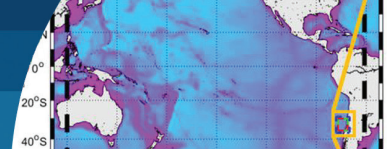
<sup>3</sup> Núcleo Milenio Comprendiendo el Sistema de Surgencia Costera en el Pasado, Ambientes Locales y Efectos Duraderos (UPWELL), Coquimbo, Chile.

*Con la modelación numérica es posible anticipar condiciones de oleaje desfavorables para la actividad portuaria. Mediante modelos numéricos acoplados es factible incluir una mayor cantidad de variables, parámetros, procesos e interacciones con el objetivo de mejorar la representación y precisión de lo que ocurre en la realidad. En este trabajo se presenta un sistema de simulación numérica para la costa de Chile central mediante el acoplamiento del modelo de oleaje Wavewatch III (WW3) con el modelo hidrodinámico Coastal and Regional Ocean Community (CROCO) y el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF). El sistema de modelación considera un acoplamiento unidireccional desde las variables de WRF que utilizan como entrada CROCO y WW3, además de un acoplamiento bidireccional entre los modelos CROCO y WW3. Este último se desarrolla a través de la implementación del software acoplador Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS-MCT3) y el uso de las herramientas de acoplamiento facilitadas por CROCO. Los resultados son contrastados con observaciones instrumentales de oleaje realizadas por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC) a través de estadígrafos como el sesgo, error cuadrático medio y correlación. Las simulaciones acopladas hidrodinamicamente presentan un mejor grado de ajuste a las mediciones en comparación con las sin acoplamiento. En este sentido, los estadígrafos revelan un menor sesgo para las alturas significativas y direcciones medias acopladas. Asimismo, se obtienen mayores valores en los coeficientes de correlación de la altura de oleaje con acoplamiento hidrodinámico.*

*Palabras clave: modelación numérica, acoplamiento oleaje-corrientes, acoplamiento bidireccional*

*Using numerical modelling it is possible to anticipate unfavorable wave conditions for port activity. In particular, using coupled numerical models it is possible to include a larger number of variables, parameters, processes and interactions with focus on improving the representation and precision of processes that occur in the environment. This paper presents a numerical simulation system applied to the coast of central Chile using a coupled tool, which includes the wave model Wavewatch III (WW3), the hydrodynamic model Coastal and Regional Ocean Community (CROCO) and the atmospheric model Weather Research and Forecasting (WRF). The coupled modeling system accounts a one-way coupling from the WRF variables that CROCO and WW3 use as input, and a two-way coupling between the CROCO and WW3 models. The latter is developed through the implementation of the coupler software Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS-MCT3) and the use of coupling tools provided by CROCO. Model results are contrasted with wave instrumental observations made by the National Hydrographic and Oceanographic Data Center of Chile (CENDHOC) using statistics error parameters such as bias, mean square error, and correlation. The hydrodynamic coupled simulations present a better adjustment to the measurements compared to those without coupling revealing a lower bias for significant wave height and mean directions. Likewise, higher values of the correlation coefficients are found in significant wave height with the hydrodynamic coupled tool.*

*Keywords: numerical modelling, wave-current coupling, two-way coupling*



## Introducción

La modelación numérica constituye una herramienta fundamental para predecir el comportamiento del oleaje y con esto anticiparse a magnitudes o eventos que sean desfavorables para la actividad portuaria. En el informe del Ministerio del Medio Ambiente (2019) se evidencia mediante simulaciones de oleaje el aumento de condiciones que tienen como consecuencia cierres de puerto. En la actualidad, existen casos de simulaciones de oleaje, corrientes y vientos del territorio chileno mediante modelos numéricos (Aguirre *et al.*, 2014; Beyá *et al.*, 2016; Falvey *et al.*, 2018). No obstante, estos casos no consideran la influencia de las corrientes sobre el oleaje o viceversa y tampoco la respuesta de ambos fenómenos sobre la atmósfera superficial.

Distintas instituciones recurren a modelos numéricos acoplados para incorporar mayor cantidad de procesos significativos en la predicción numérica de fenómenos naturales en el tiempo (*e.g.* NOAA<sup>1</sup>, ECMWF<sup>2</sup>, IRD<sup>3</sup>, WCRP<sup>4</sup>). Sin embargo, corresponden a modelos globales de baja resolución que se enfocan en el comportamiento general del planeta y no en áreas regionales en donde se necesita mayor resolución espacial para representar sus procesos. Oerder *et al.* (2016) y Putrasahan *et al.* (2013) corresponden a ejemplos entre la escasa literatura de modelos numéricos acoplados bidireccionalmente para las costas chilenas. Estos casos se enfocan en simular el sistema océano-atmósfera sin considerar el oleaje.

A propósito de las limitaciones de la investigación, la dinámica de cada modelo está dominada por las ecuaciones de gobierno para pronosticar aproximadamente el comportamiento de distintas variables físicas (*e.g.* energía transportada por las olas, velocidad de la partícula de fluido, temperatura del medio, entre otras). En realidad, existen fenómenos físicos que escapan de las ecuaciones de gobierno por su complejidad o escala de acción, los cuales tienen incidencia en los procesos representados y son incluidos en la simulación mediante parametrizaciones

físicas (Hourdin *et al.*, 2017). La gran cantidad de coeficientes y parámetros empleados por cada modelo en estas formulaciones aumentan considerablemente los grados de libertad para obtener resultados. Por lo tanto, la finalidad de la investigación recae en el trabajo organizado entre los modelos numéricos con un set en específico de parametrizaciones físicas y se orienta la evaluación de los resultados al comportamiento del oleaje con y sin acoplamiento hidrodinámico.

En este trabajo se presenta un sistema de simulación numérica para la costa de Chile central mediante el acoplamiento del modelo de oleaje Wavewatch III (WW3) con el modelo hidrodinámico Coastal and Regional Ocean Community (CROCO) y el modelo atmosférico Weather and Forecasting (WRF). El modelo WRF fuerza a WW3 y CROCO sin recibir retroalimentación, mientras que estos últimos trabajan paralelamente intercambiando información mediante el software acoplador Ocean Atmosphere Sea Ice Soil (OASIS-MCT3). De esta manera, la herramienta tiene la capacidad de calcular los flujos de variables atmosféricas, la generación y propagación del oleaje y la hidrodinámica de las corrientes, permitiendo el traspaso de información entre los modelos implicados.

## Metodología Modelo de oleaje

El WW3 versión 6.07 es un modelo espectral de oleaje de tercera generación desarrollado por National Centers for Environmental Prediction NCEP (WW3DG, 2019). La representación del oleaje se basa en la conservación de la energía espectral para simular procesos de generación, propagación y disipación de la energía. El dominio computacional se construye sobre los datos batimétricos globales ETOPO2v2 de 2° de resolución (NOAA, 2006). El oleaje que arriba a las costas de Chile central se reconstruye mediante dos dominios anidados para considerar la energía proveniente desde el Océano Pacífico e incluirla en los bordes de la simulación regional. La Simulación del Océano Pacífico (SOP) o dominio padre abarca desde 70°N hasta 70°S en latitud y desde 100°E hasta 60°W en longitud con una resolución de 0.5°, mientras que el dominio hijo de 1/10° (~10 km) de resolución considera geográficamente desde 30°S hasta 36°S en latitud y desde 77°W hasta 71°W en longitud (Figura 1).

1 National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://www.noaa.gov/>

2 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <https://www.ecmwf.int/>

3 Institut de Recherche pour le Développement, <https://es.ird.fr/>

4 World Climate Research Programme, <https://www.wcrp-climate.org/>

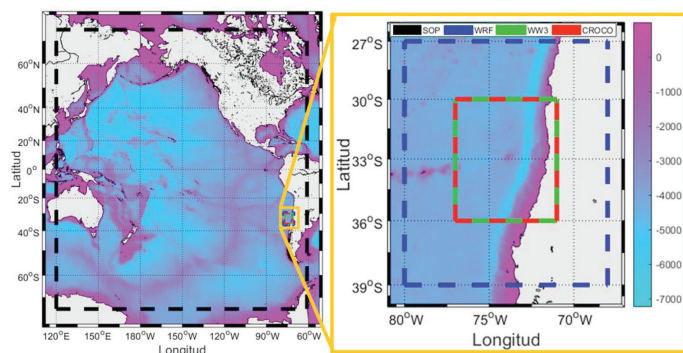
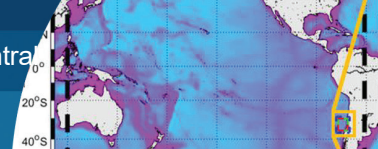


Figura 1: Batimetría y dominios utilizados en el sistema de simulación numérica

La generación y propagación del oleaje se resuelve sobre espectros de 24 frecuencias, desde 0.04118 Hz con un factor de incremento de 1.1 Hz y 25 direcciones a partir de los 0° hasta los 345.6°. Los pasos de tiempo globales utilizados en el desarrollo de las ecuaciones de gobierno son de 3600 s y 900 s para el dominio padre e hijo respectivamente. En el caso de los pasos de tiempo de propagación espacial, infraespectral y de integración de los términos fuentes se determinan a partir de recomendaciones (WW3DG, 2019; Splinder y Tolman, 2008). Las principales parametrizaciones físicas empleadas se exponen en la Tabla 1, las cuales están incorporadas en el switch Ifremel disponible en la versión de WW3 v6.07.

Tabla 1: Parametrizaciones físicas para la simulación de oleaje (WW3DG, 2019)

Parametrización	Referencia	Opción física
Crecimiento y disipación de energía debido al viento	Calavari y Malonatte-Rizzoli con filtro. Paquete de términos fuentes de Arduin. Esquema de propagación de segundo orden (UNO)	LN1 ST4 UQ
Disipación inducida por el fondo	SHOWEX	BT4
Rotura inducida por el fondo	Battjes-Janssen	DB1
Dispersión inducida por el fondo	No se utiliza dispersión por fondo	BS0
Interacciones no lineales entre cuádrupletas	Aproximación por interacciones discretas (DIA)	NL1
Interacciones no lineales entre triadas	No se utilizan interacciones de triada	TR0

El forzamiento atmosférico del modelo de oleaje consiste principalmente en información de las componentes zonal y meridional de la velocidad del viento a 10 m de altura. Por una parte, la SOP utiliza campos forzantes de la velocidad del viento y hielo marino del reanálisis ERA5 (C3S, 2017; Hersbach *et al.*, 2018). Por otra parte, la simulación regional es forzada con resultados de la velocidad del viento simulados por el modelo WRF.

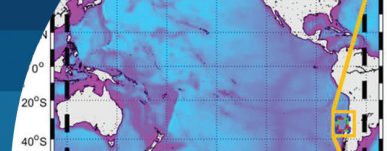
## Modelo atmosférico

El WRF versión 4.1.2 es un modelo regional de circulación atmosférica que utiliza el solucionador dinámico de Investigación Avanzada WRF (ARW) y fue desarrollado principalmente por el Centro Nacional de Investigación Atmosférica NCAR (Skamarock *et al.*, 2021). La dinámica atmosférica se basa en la integración de las ecuaciones de Euler no-hidrostáticas totalmente compresibles con opciones hidrostáticas disponibles. El modelo representa el estado de la atmósfera sobre una grilla tridimensional discretizada con Arakawa C-grid (Arakawa y Lamb, 1977) y coordenadas verticales híbridas sigma-presión (Park *et al.*, 2013).

El dominio se construye a partir de los datos geográficos estáticos provenientes de la página de usuarios WRF (NCAR, 2018). La grilla de cálculo cubre desde 27°S hasta 39°S en latitud y de 80°W a 68°W en longitud con una resolución horizontal de 8 km (~1/12 °). En la vertical, el dominio se discretiza en 38 niveles. Las ecuaciones de gobierno se resuelven con un paso de tiempo de 40 s. El set de parametrizaciones físicas utilizadas se exhibe en la Tabla 2.

Tabla 2: Parametrizaciones físicas de la simulación atmosférica (Skamarock *et al.*, 2021)

Parametrización	Referencia	Opción física
Microfísica	Esquema WSM 3-class	mp_physics = 3
Radiación atmosférica	Modelo de transferencia radiativa rápida. Esquema Dudhia	ra_lw_physics = 1 ra_sw_physics = 1
Cúmulos	Esquema Kain-Fritsch	cu_physics = 1
Capa superficial	Esquema de similitud de Monin-Obukhov	sf_sfclay_physics = 1
Superficie terrestre	Modelo de superficie terrestre de Noah	sf_surface_physics = 2
Capa límite planetaria	Esquema YSU	bl_pbl_physics = 1



Las condiciones iniciales y de borde para la representación del estado de la atmósfera se obtienen a partir del reanálisis ERA5 (C3S, 2017; Hersbach *et al.*, 2018). Es por ello que se descarga información para 38 niveles de presión y un nivel superficial, donde se incluye datos de geopotencial, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, máscara tierra-mar, presión, capa de hielo marino, entre otros.

## Modelo hidrodinámico

CROCO v1.0 es un modelo de circulación oceánica y superficie libre desarrollado por un consorcio francés. Entre sus socios destacan el Instituto de Investigación y Desarrollo de Francia (IRD), Instituto Nacional de Ciencias Oceánicas (Ifremer), el Instituto francés de investigación en ciencias y tecnologías digitales (INRIA), entre otros (Jullien *et al.*, 2022). El modelo se basa en la solución del sistema de ecuaciones primitivas con seguimiento del terreno en superficie libre. El océano se discretiza mediante Arakawa C-grid (Arakawa y Lamb, 1977) y el sistema de coordenadas verticales Sigma  $\sigma$  (Haney, 1991).

El dominio computacional se confecciona a través de la batimetría ETOPO2V2 (NOAA, 2006) desde 30°S hasta 36°S en latitud y de 77°W a 71°W en longitud (Figura 1). La grilla horizontal tiene una resolución de 1/12 ° (~8 km) y en la vertical la discretización se realiza sobre 32 niveles. El paso de tiempo empleado es de 450 s. En la Tabla 3 se muestran las parametrizaciones físicas utilizadas para incluir la turbulencia en la circulación de las corrientes.

Tabla 3: Parametrizaciones físicas de la simulación hidrodinámica (Jullien *et al.*, 2022)

Parametrización	Referencia	Opción física
Mezcla vertical	Parametrización Perfil K (KPP)	LMD_MIXING
	Mezcla de KPP de la capa límite de la superficie	LMD_SKPP
	Mezcla de KPP de la capa límite inferior	LMD_BKPP
	Mezcla interior inestabilidad cortante	LMD_RIMIX
	Mezcla interior por convección	LMD_CONVEC
	Transporte no local para SKPP	LMD_NONLOCAL
Difusión horizontal	Advección de trazador horizontal Mezcla horizontal	TS_HADV_UP3
	Laplaciana de momentum	UV_VIS2 UV_
	Viscosidad turbulenta de Smagorinsky	VIS_SMAGO

Las condiciones iniciales y de borde son generadas mediante el reanálisis oceánico SODA versión 1.4.2 (Carton y Giese, 2008). Esta información provee datos de temperatura, salinidad, nivel del mar y velocidad de las corrientes. La superficie atmosférica es forzada con los resultados WRF, donde se necesita la radiación térmica, radiación solar, temperatura superficial, precipitación, humedad específica y velocidad del viento superficial.

## Sistema de acoplamiento

El sistema de acoplamiento está basado en la simulación de los campos atmosféricos por parte de WRF, los elementos del oleaje se representan mediante WW3 y las variables oceanográficas a partir de CROCO. En la Figura 2 se exhibe el traspaso de campos entre los modelos numéricos incluyendo el forzamiento atmosférico a partir del reanálisis ERA5 y el anidamiento del modelo de oleaje. De esta manera, el sistema de simulación considera un acoplamiento unidireccional desde WRF hacia WW3 y CROCO, además de uno bidireccional entre el modelo de oleaje y el hidrodinámico.

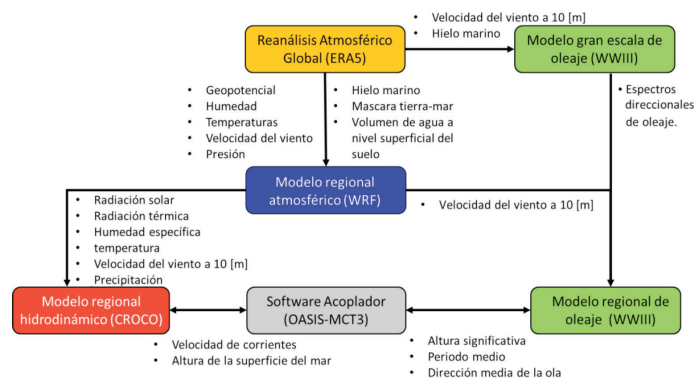
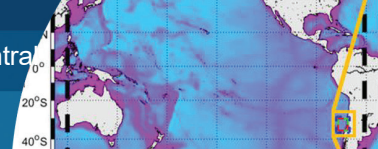


Figura 2: Traspaso de variables del Sistema Océano-Oleaje-Atmósfera

El acoplamiento en una dirección se realiza a través de los resultados del modelo atmosférico, es decir, que estos campos no reciben retroalimentación del estado del océano simulado por los otros modelos. Dichos datos atmosféricos son interpolados a la resolución espacial de WW3 y CROCO por parte de subprogramas de preprocesamiento contenidos en cada uno de ellos. Por consiguiente, previo a la simulación acoplada en dos direcciones se debe contar con los campos prescritos en formato compatible con WW3 y CROCO.



El OASIS3-MCT versión 4.0 es un software capaz de organizar el intercambio de información entre códigos de distintos modelos numéricos (Valcke *et al.*, 2018). Fue desarrollado por el Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Informática Científica (CERFACS) y el Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS). Este software utiliza internamente el Kit de Herramientas de Acoplamiento de Modelos (MCT) desarrollado por el Laboratorio Nacional Argonne de los Estados Unidos (ANL) (Jacob *et al.*, 2005; Larson *et al.*, 2005).

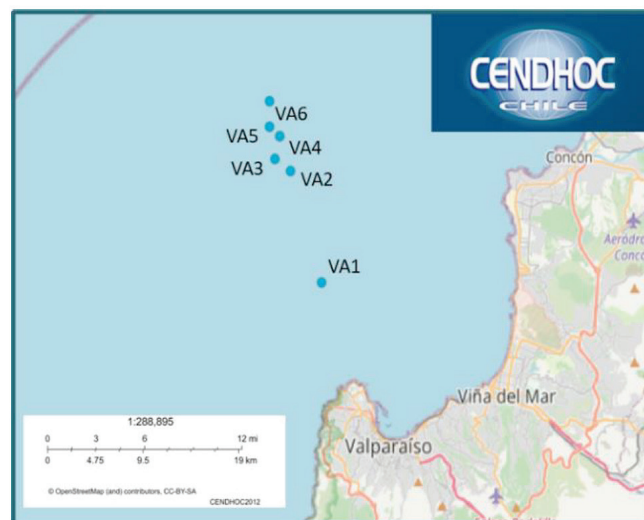
Al respecto del acoplamiento bidireccional, OASIS3-MCT tiene la capacidad de identificar el tipo de variables a interpolar sobre las grillas de cálculo y los pasos de tiempo para recibir y entregar la información correspondiente. El paso de tiempo para el acoplamiento o intercambio de variables se realiza cada 900 s. La ejecución de CROCO y WW3 se efectúa de manera simultánea, la integración de las ecuaciones de gobierno se realiza en cada paso de tiempo de los modelos y se entregan sus valores a OASIS3-MCT. Una vez alcanzado el paso de tiempo del acoplamiento, el modelo hidrodinámico recibe las variables de oleaje y viceversa.

Es preciso señalar, que la implementación de los modelos numéricos y el software acoplador fue realizada en el Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC), ubicado en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. El clúster utilizado lleva el nombre de Leftraru, el cual concede acceso a almacenamiento y a alta capacidad de cómputo para el uso de los modelos. Además, la instalación y compilación de los programas fue realizada por parte del equipo de soporte técnico del NLHPC.

## Datos de observación

Los resultados son contrastados con observaciones instrumentales de oleaje realizadas por el CENDHOC. Las mediciones fueron efectuadas mediante boyas Triaxys en torno a los  $-32.93^{\circ}\text{S}$  en latitud y  $-71.68^{\circ}\text{W}$  en longitud, por periodos de tiempo intermitentes desde junio del 2000 hasta agosto del 2004 (Figura 3). La información de las boyas es comparada a través de estadígrafos como el sesgo (BIAS), raíz del error cuadrático medio (RMSD) y coeficiente de correlación (R) para evaluar el desempeño

de las simulaciones de oleaje con y sin acoplamiento hidrodinámico.



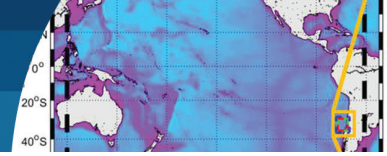
	Fecha inicio	Fecha fin	Parámetro
VA1	01-06-2000	30-09-2000	Hs, Dm y Tp
VA2	01-03-2001	31-01-2001	Hs, Dm y Tp
VA3	01-02-2002	31-03-2002	Hs, Dm y Tp
VA4	01-08-2002	31-12-2002	Hs, Dm y Tp
VA5	01-02-2003	07-08-2004	Hs, Dm y Tp

Figura 3: Información de registros instrumentales de oleaje (Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile CENDHOC)

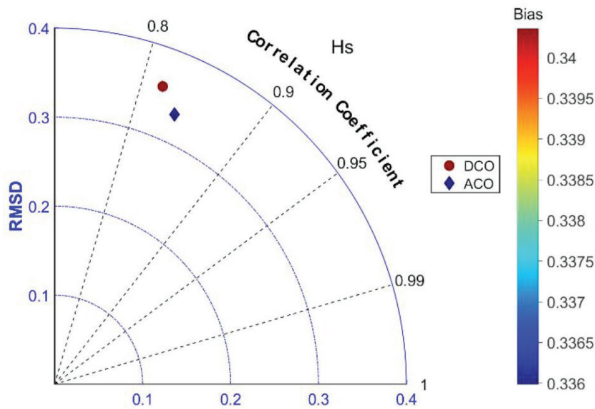
## Resultados

En la Figura 4 se muestran diagramas de Taylor para comparar la altura significativa, dirección media y periodo peak de las simulaciones con acoplamiento corrientes-oleaje (ACO) y desacopladas (DCO) versus mediciones de boyas instrumentales. Dichos diagramas agrupan el coeficiente de correlación, la raíz del error medio cuadrático y el sesgo en un solo gráfico. El cálculo de los estadígrafos fue realizado a partir de la agrupación de toda la información disponible por las boyas para considerar el comportamiento general del modelo. De esta forma, se cuantifica la consistencia de los resultados para representar las características del oleaje medido en Chile central, frente a la costa de Valparaíso.

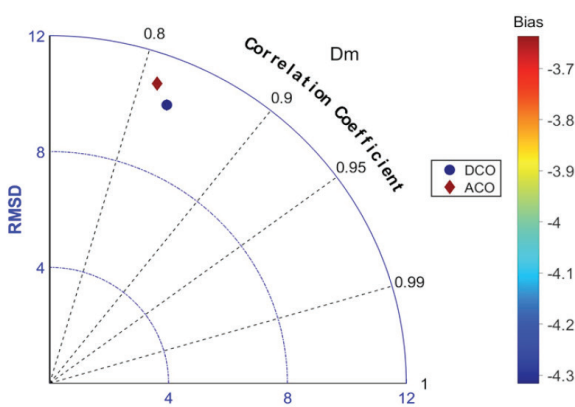
En el caso de la altura, la simulación acoplada presenta un mejor coeficiente de correlación, un menor sesgo y raíz del



## a) Altura significativa, m



## b) Dirección media °



## c) Dirección media °

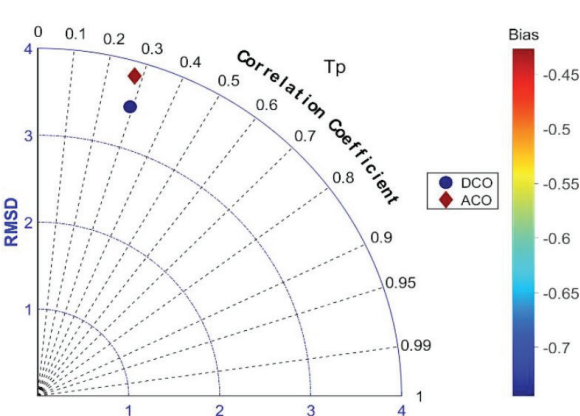


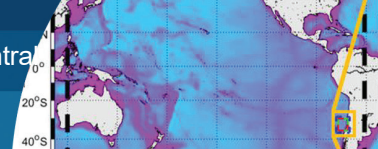
Figura 4: Diagramas de Taylor para los parámetros del oleaje promedio

error medio cuadrático en comparación a la no acoplada. Esto quiere decir que la simulación acoplada presenta una mejor representación de la variabilidad de la altura y sus valores son más cercanos a las observaciones. Por el lado de la dirección, la simulación acoplada presenta un menor R y un mayor RMSD, pero presenta un menor BIAS. En este sentido, la simulación acoplada presenta una menor

sobrestimación de los valores de dirección con respecto a los desacoplados. Cabe destacar, que el parámetro con menor ajuste corresponde a los periodos peak con correlaciones de 0.29 (ACO) y 0.30 (DCO). Aunque tengan RMSD cercanos a 3 s y sesgos inferiores a 1 s, se descartan del análisis por su inadecuada representación basada en los bajos valores de R.

Al respecto, las mejoras en los resultados debido a la inclusión de variables oceanográficas en la representación del oleaje pueden tener implicancias en los pronósticos de su arribo hacia zonas costeras. Un mejor ajuste de la variabilidad de altura de la ola implica consecuencias positivas para determinar las ventanas de tiempo que presenten condiciones desfavorables sobre las actividades portuarias o usos del borde costero. La mayor sobrestimación de altura por parte del modelo desacoplado se podría traducir en predicciones de cierres de puertos innecesarios o alertas de sobrepaso erradas en paseos marítimos. Además, la reducción del sesgo de la dirección media acoplada con respecto a la desacoplada conlleva un aumento de la fiabilidad para determinar la exposición de una determinada zona según su orientación geográfica. Por lo tanto, el uso de modelos acoplados entre oleaje y corrientes podría ser beneficioso para la planificación de operaciones portuarias y determinación de la exposición de sistemas humanos y naturales.

El uso de modelos numéricos requiere de ordenadores de alta capacidad de cómputo ya que las simulaciones del ambiente marítimo están descritas en su mayoría por ecuaciones diferenciales parciales que traducen leyes físicas. En este sentido, al recurrir a modelos acoplados es indispensable, por una parte, disponer de almacenamiento suficiente para contar con los softwares instalados y compilados, además de las entradas, salidas y archivos de programa. Por otra parte, es necesario que los ordenadores tengan alta capacidad de cálculo y múltiples procesadores para soportar la ejecución simultánea de los modelos y paralelizar los trabajos con el fin de optimizar las tareas y reducir los tiempos de cómputo. De esta manera, el costo computacional adicional va a depender de la cantidad de modelos numéricos utilizados y de sus características, resultando así en un aspecto clave para la elección del tipo de modelo a emplear.



## Conclusión

El propósito de la presente investigación fue generar un sistema de simulación numérica para la costa de Chile central mediante modelos numéricos acoplados. Para esto, se organizó la ejecución de los modelos WRF, CROCO y WW3, además del uso de OASIS3-MCT para realizar el intercambio simultáneo de información entre estos dos últimos. Los resultados obtenidos por parte de las simulaciones de oleaje permitieron comprobar que las alturas significativas con acoplamiento hidrodinámico presentaron un mejor ajuste a las observaciones instrumentales frente a la costa de Valparaíso. Dichas mejoras podrían implicar una mayor precisión para determinar el arribo del oleaje en zonas costeras, beneficiando así a la planificación de operaciones portuarias, uso del borde costero, determinación de la exposición de sistemas humanos y naturales, entre otras. En cuanto a las limitaciones del presente trabajo, los altos grados de libertad con respecto a las parametrizaciones físicas de cada modelo conlleva una gran cantidad de combinaciones. Sin embargo, la calibración y validación de éstas implica la posibilidad de mejorar los ajustes de las simulaciones de oleaje. Por lo tanto, se recomienda validar las simulaciones con más observaciones tanto de oleaje como de la hidrodinámica del océano para disponer de más estadística y mejorar la evaluación del desempeño del sistema de simulación. Con esto, fomentar el uso de modelos numéricos acoplados y mejorar la literatura con parámetros y formulaciones que se representen de manera adecuada la dinámica costera. Entre las proyecciones, uno de los pasos siguientes es incluir en el acoplamiento bidireccional al modelo WRF para estudiar cómo afectan los cambios de la rugosidad de la superficie marina o sus cambios de temperatura sobre la parte baja de la atmósfera. En definitiva, se podría contribuir a la actividad portuaria del país con el estudio y representación de las alturas de ola, corrientes y vientos que se desarrollan en la zona.

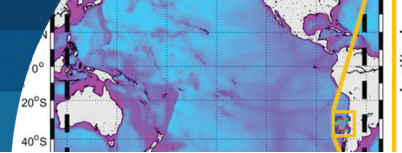
## Agradecimientos

Los autores agradecen a FONDECYT Iniciación N°11171163, “Extreme wave climate of the Southeast Pacific: interannual variability and projections under climate change”, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) FONDAP 15110009 y FONDEF

ID21I10404, “Desarrollo de una escala de impacto de marejadas para la comunicación efectiva y la reducción del riesgo de desastre”. Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

## Referencias

- Aguirre, C., Garreaud, R.D. and Rutllant, J.A. (2014). Surface ocean response to synoptic-scale variability in wind stress and heat fluxes off south-central Chile. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 65, 64-85
- Arakawa, A. and Lamb, V.R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics. General Circulation Models of the Atmosphere*. Academic Press, New York, USA, vol. 17, 173-265
- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, F., Winckler, P. y Molina, M. (2016). Atlas de oleaje de Chile. Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile
- C3S (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), European Union
- Carton, J.A. and Giese, B.S. (2008). A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA). *Monthly Weather Review* 136(8), 2999-3017
- Falvey, M., Ibarra, M., Pérez, R. y Hernández, V. (2018). Explorador eólico, descripción y guía de uso. Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Haney, R.L. (1991). On the pressure force over steep topography in sigma coordinate ocean models. *Journal of Physical Oceanography* 21(4), 610-619
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D. and Thépaut, J. (2018). ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)
- Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J.C., Balaji, V., Duan, Q., Folini, D., Ji, D., Klocke, D., Qian, Y., Rauser, F., Rio, C., Tomassini, L., Watanabe, M. and Williamson, D. (2017). The art and science of climate model tuning. *Bulletin of the American*



*Meteorological Society* 98(3), 589–602

Jacob, R., Larson, J. and Ong, E. (2005). M×N communication and parallel interpolation in Community Climate System Model Version 3 using the model coupling toolkit. *International Journal of High Performance Computing Applications* 19(3), 293-307

Jullien, S., Caillaud, M., Benshila, R., Bordoís, L., Cambon, G., Dufois, F., Dumas, F., Gula, J., Le Corre, M., Le Gentil, S., Lemarié, F., Marchesiello, P., Morvan, G. and Theetten, S. (2022). Croco Technical and numerical documentation (1.2) Zenodo. France

Larson, J., Jacob, R. and Ong, E. (2005). The model coupling toolkit: A new Fortran90 toolkit for building multiphysics parallel coupled models. *The International Journal of High Performance Computing Applications* 19(3), 277-292

Ministerio del Medio Ambiente (2019). Volumen 2: Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile. Preparado por Winckler, P.; Contreras-López, M.; Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

NCAR (2018). WRF users page: WRF preprocessing system (WPS) geographical input data mandatory fields downloads. National Center for Atmospheric Research Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory, USA, [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_sources\\_wps\\_geog.html](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html)

NOAA (2006). 2-minute gridded global relief data (ETOPO2) v2. National Geophysical Data Center, NOAA National Centers for Environmental Information, USA

Oerder, V., Colas, F., Echevin, V., Masson, S., Hourdin, C., Jullien, S., Madec, G. and Lemarié, F. (2016). Mesoscale SST–wind stress coupling in the Peru–Chile current system: which mechanisms drive its seasonal variability?. *Climate Dynamics* 47, 2309–2330

Park, S.H., Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Fowler, L.D. and Duda, M.G. (2013). Evaluation of global atmospheric solvers using extensions of the Jablonowski and Williamson baroclinic wave test case. *Monthly Weather Review* 141(9), 3116-3129

Putrasaham, D.A., Miller, A.J. and Seo, H. (2013). Regional coupled ocean–atmosphere downscaling in the Southeast Pacific: impacts on upwelling, mesoscale air–sea fluxes, and ocean eddies. *Ocean Dynamics* 63, 463-488

Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J., Duda, M., Barker, D. and Huang, X. (2021). A description of the advanced research WRF Version 4 (Vols. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR). National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA

Splinder, D.M. and Tolman, H. (2008). Example of WAVEWATCH III for the NE Pacific. Tech. Note 259, NOAA/NWS/NCEP Camp Spring MD, USA

Valcke, S., Craig, A. and Coquart, L. (2018). OASIS3-MCT user guide, OASIS3-MCT4.0, CECI, Université de Toulouse, CNRS. CERFACS-TR-CMGC-18-77, Toulouse, France

WW3DG (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III Development Group, version 6.07. Technical Note 333. NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA