

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

EVALUACIÓN DE UNA IMPLEMENTACIÓN DE MODELADO OLEAJE-CORRIENTE PARA EL PRONÓSTICO OPERACIONAL DE CORRIENTES DE RESACA EN LA ZONA DE ROMPIENTES.

JOSÉ M. OSSA¹, LEANDRO SUÁREZ², RODRIGO CIENFUEGOS^{3,4,5}

1 RESUMEN

En el presente informe se presenta el trabajo realizado para la evaluación de la implementación de un modelado de las corrientes de resaca para un sistema de pronóstico operacional en la zona norte de la bahía de Las Cruces, El Tabo, propuesto por el centro de investigación MERIC. Las corrientes de resaca son angostas, largas e intensas corrientes que se extienden desde la zona de rompiente hacia mar adentro, generando riesgos asociados a los bañistas e infraestructura costera.

Para la modelación de las corrientes de resaca se utilizó un modelo tridimensional no-hidrostático llamado CROCO que es capaz de reproducir el fenómeno. El modelo fue analizado desde la creación de las condiciones de borde necesarias para la modelación hasta el análisis de los resultados arrojados por el modelo CROCO, evaluando variables como la vorticidad, la disipación, entre otras.

Dentro de los resultados más relevantes, se estimó que la resolución espacial óptima para el caso analizado de Las Cruces es de 2 metros, debido a que las variables convergieron adecuadamente, obteniéndose una buena relación entre costo computacional y precisión. Además, se reprodujeron las corrientes de resaca en la batimetría de la playa de Las Cruces y se pudo relacionar con los patrones de vorticidad y disipación, dando evidencia de la conectividad de estos procesos.

Se concluyó que es posible reproducir corrientes de resaca de manera operacional, siempre y cuando se tengan las condiciones de borde actualizadas, una buena batimetría y un control sobre la resolución espacio-temporal del modelo.

¹Ingeniero, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, juossa@uc.cl

²Ingeniero de investigación, MERIC - Marine Energy Research & Innovation Center, Santiago, Chile. leandro.suarez@meric.cl

³Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, racienfu@uc.cl

⁴MERIC - Marine Energy Research & Innovation Center, Santiago, Chile

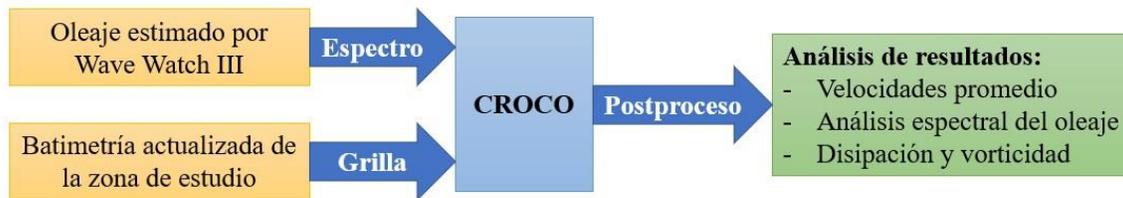
⁵Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN).

• **INTRODUCCIÓN**

El centro de investigación MERIC (*Marine Energy Research and Innovation Center*) tiene como función el análisis de los procesos marinos costeros, generando innovadoras soluciones que apoyen el desarrollo de las energías marinas. En el marco de este programa, se busca analizar la posibilidad de la implementación de un sistema de pronóstico operacional que sea capaz de predecir diferentes procesos costeros y alertar en caso de existir un riesgo asociado. Para esto se están realizando los estudios necesarios en la bahía de Las Cruces, y su potencial para poder replicarlo en otras bahías de Chile, con el propósito de tener un mejor entendimiento de la dinámica del océano y su interacción con la tierra y la atmósfera.

Dentro de este macroproyecto, uno de los procesos costeros relevantes es la generación de corrientes de resaca en la zona de rompientes de las playas, que son un peligro para bañistas. Para poder predecir las corrientes de resaca se realizó una evaluación del modelado de las corrientes utilizando el modelo CROCO, identificando las condiciones y datos que se deben tener para reproducirlas convenientemente y predecir en el futuro la formación de ellas; además de identificar las variables de salida y cómo interpretarlas, relacionándolas con procesos físicos de la zona de rompientes. Un esquema representativo del proceso del pronóstico de corrientes de resaca se muestra en la figura 1 con los modelos, datos y procesos relevantes.

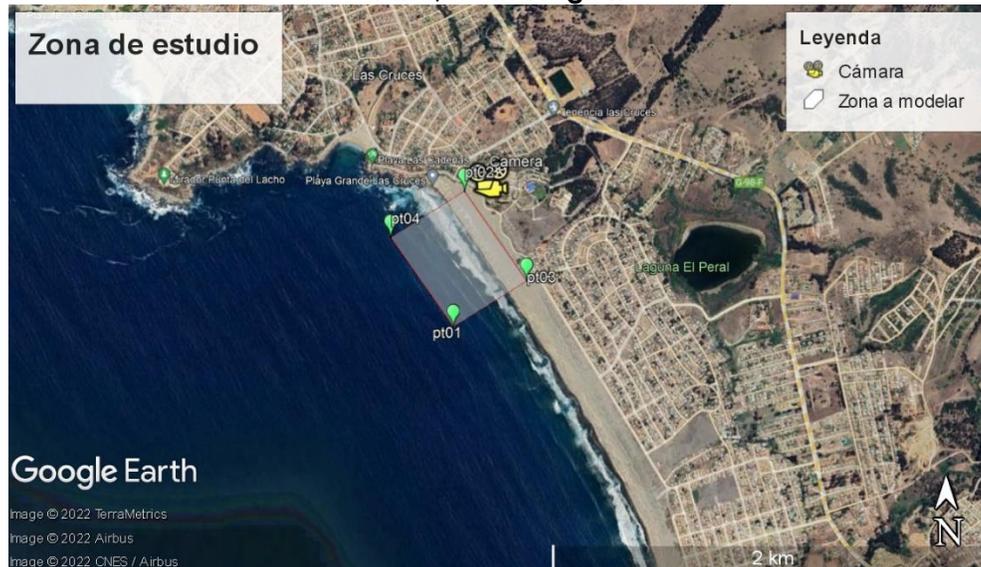
Figura 1: Esquema representativo del sistema de pronóstico de corrientes de resaca.



Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de este estudio fue evaluar la implementación de un modelado de las corrientes de resaca en la playa de la zona norte de la bahía de Las Cruces, comuna de El Tabo (figura 2), para analizar su utilidad dentro del sistema de pronóstico operacional que MERIC busca implementar. Se busca evaluar la posibilidad de predecir, según clima de oleaje y batimetría, las corrientes de resaca que podrían formarse en la zona de rompientes, permitiendo cuantificar el potencial peligro que revisten para las personas que frecuentan la playa.

Figura 2: Zona de estudio de las corrientes de resaca en la bahía de Cartagena, comuna de El Tabo, cuarta región.



Fuente: Google Earth.

- **MARCO TEÓRICO**

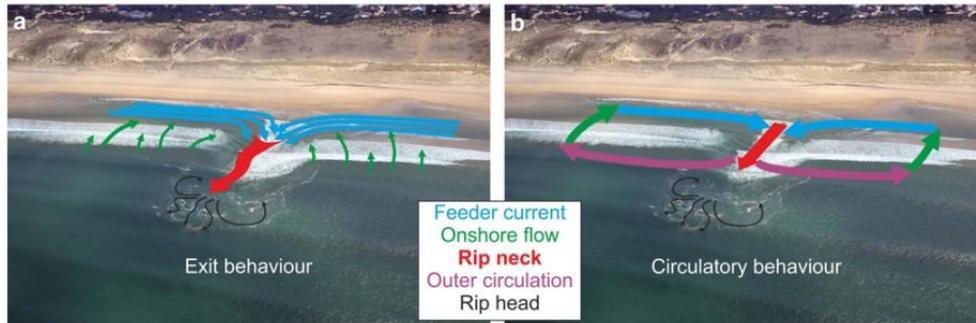
Las corrientes de resaca o *rip currents* son corrientes generalmente angostas, largas e intensas que se extienden desde la zona de rompientes, donde afectan a toda la columna de agua, hacia mar adentro, formando fuertes esfuerzos de corte verticales con el agua más profunda (Marchesiello et al., 2015). En la figura 3 se muestra una foto de una corriente de resaca de la playa de Las Cruces tomada con un dron. Además, en la figura 4 se muestra una estructura típica de los procesos de las corrientes de resaca.

Figura 3: Imagen corriente de resaca en la playa de Las Cruces.



Fuente: Dron durante campaña equipo MERIC, 2018.

Figura 4: Estructura típica de una corriente de resaca.



Fuente: Castelle et al., 2016.

Las corrientes de resaca se forman principalmente por la variación en la dirección paralela a la costa de la altura del oleaje rompiente.

Tomando como referencia los procesos que provocan las corrientes de resaca, Castelle et al. (2016) generó una clasificación de estas estructuras, tomando tres mecanismos forzantes que dominan el proceso; (1) corrientes de resaca hidrodinámicas, que no tienen relación con forzantes morfológicas, lo que las convierte en corrientes que varían en el espacio y el tiempo, (2) corrientes de resaca batimétricas, donde la condición hidrodinámica está fuertemente influenciada por la variabilidad morfológica, y (3) corrientes de resaca de borde, que están influenciadas por bordes laterales, tanto naturales como antropogénicos.

Las dimensiones de las corrientes de resaca pueden ser de hasta 100 metros de largo y 10 metros de ancho, alcanzando velocidades de 1 y 2 m/s (Marchesiello et al., 2015), suficiente para significar un peligro para las personas que se encuentran dentro del agua, ya que se estima que la velocidad mínima para que una corriente de resaca sea peligrosa es a partir de los 0,2 m/s (Moulton et al., 2017). De hecho, el 2018 un 85% de los rescates en playas de la costa oeste de Estados Unidos fueron debido a las corrientes de resaca (Johnson, 2020). En el caso de nuestro país, un 89,1% de las playas no son aptas para el baño debido principalmente a la presencia de dichas corrientes (Cuadra, 2022).

La investigación sobre corrientes de resaca aún sigue siendo un tema de estudio por la comunidad científica, quienes han relacionado la presencia de corrientes de resaca con otros procesos físicos como, por ejemplo, la presencia de oscilaciones de muy baja frecuencia (*Very Low Frequency* o VLF) en la zona de la corriente donde la velocidad es máxima (llamada *rip neck*). Además, la variabilidad intrínseca de las corrientes costeras es capaz de generar vorticidad y esfuerzos de corte que son capaces de formar estructuras como las corrientes de resaca (Marchesiello et al. 2015).

• METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología seguida para lograr los resultados esperados por MERIC de este proyecto. Se explica el funcionamiento del modelo utilizado, la forma de tomar las condiciones de borde acordes a la zona de estudio de Las Cruces, las ecuaciones que rigen los

resultados y la forma en que se interpretaron estos para mostrar la presencia de corrientes de resaca.

- Modelo CROCO

CROCO (*Coastal and Regional Ocean COmmunity model*) es un modelo oceánico tridimensional que resuelve las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes en la superficie libre y con una grilla *terrain-following*, es decir, que la discretización espacial vertical es por capas que se ajustan a la batimetría del terreno. En este modelo se pueden modelar tanto sistemas regionales (escala espacial grande) como costeros (escala espacial pequeña) de forma realista, con una gran precisión numérica, buen desempeño computacional y de fácil acceso (Marchesiello et al., 2021).

El sistema de modelado CROCO incluye una serie de casos de prueba que permiten familiarizarse con el programa y explorar las diferentes opciones que permitía al momento de modelar un sistema, entre ellas varios casos de corrientes RIP. El modelo ofrece diferentes configuraciones y formas de resolver las ecuaciones, en el caso de la modelación de las corrientes de resaca, ésta se realizó de manera no-hidrostática debido a que las aplicaciones que han utilizado el supuesto hidrostático han subestimado la vorticidad horizontal que caracteriza a las corrientes de resaca. Además, CROCO se implementó en el modo tridimensional debido a que los modelos integrados en profundidad desprecian el efecto del esfuerzo de corte vertical, proceso clave al momento de la generación de vorticidad (Marchesiello et al., 2021).

- Condiciones de borde

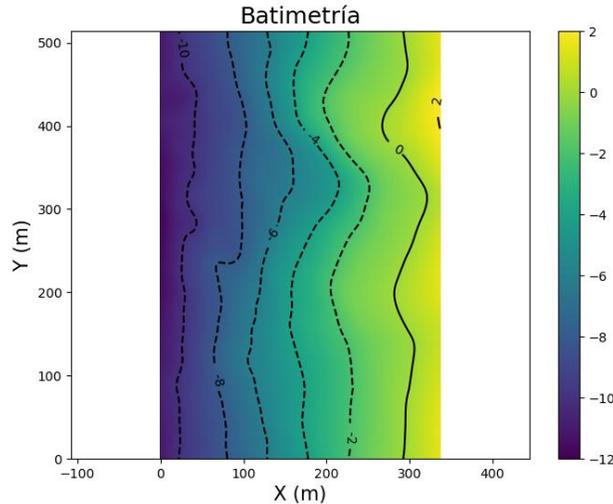
Como en cualquier otro modelo numérico, CROCO requiere de condiciones de borde que representen la física del problema. Para el caso de la modelación de corrientes de resaca, se tomaron como condiciones de borde principales la batimetría y el clima de oleaje en una zona en donde se tienen observaciones de campo.

- Batimetría

La batimetría corresponde al levantamiento topográfico del fondo marino y juega un rol muy importante en la hidrodinámica del oleaje, ya que cuando las olas comienzan a interactuar con el fondo marino aparecen procesos no lineales, como el asomeramiento y el rompimiento. Además, existe una relación de *feedback* entre el oleaje y el fondo marino, ya que la energía del agua es capaz de alterar el lecho de la zona costera, lo que, a su vez, puede alterar la dinámica del oleaje.

Para representar el fondo marino de la zona de estudio se utilizaron los datos de batimetría medidos en una campaña realizada en febrero del 2018, en donde con un sonar monohaz se midieron datos del fondo marino en diferentes puntos de la bahía. Estos datos se interpolaron para obtener un mapa de batimetría general de la bahía. Luego, para tomar el dominio específico que se deseaba modelar, se utilizó una herramienta de preprocesamiento de CROCO, donde con las coordenadas del dominio, se interpola linealmente tomando como base el mapa de batimetría creado con anterioridad. En la figura 5 se muestra la grilla definitiva que se utilizó al momento de modelar las corrientes de resaca, que se puede también ver en la Figura 2.

Figura 5: Batimetría de la zona de estudio de corrientes de resaca en playa Las Cruces.



Fuente: Elaboración propia

- Clima de oleaje

Una forma de interpretar resultados de un estado de mar es mediante el análisis espectral del oleaje, es decir, calculando los espectros y cuantificando variables relevantes asociadas al estado de mar (Holthuijsen, 2007). Para la confección de las condiciones de borde de oleaje se utilizó un oleaje de tipo Jonswap de altura significativa de 1 m, periodo peak de 11 s y dirección perpendicular a la línea de costa. La transformación de un oleaje espectral a series de tiempo, se realizó utilizando un modelo estocástico que reconstruye las alturas de olas para cada frecuencia a partir del espectro y asume una distribución de fases aleatorias; este esquema se validó a través de los datos experimentales disponibles para el canal artificial del Instituto Nacional de Hidráulica (INH) (Cienfuegos et al., 2013).

- Análisis de resultados

Para el análisis de resultados es necesario considerar diversos factores. Por un lado, analizar el comportamiento del oleaje dentro del dominio entrega una idea de cómo reacciona dicho oleaje a una batimetría impuesta como condición de fondo. Por otro lado, para el análisis de las corrientes de resaca es importante considerar algunas variables extras; como la vorticidad, la disipación y flujos de energía.

- Análisis espectral del oleaje

A partir del espectro de oleaje es posible extraer parámetros de oleaje relevantes en el análisis de resultados. Por ejemplo, se puede calcular la altura significativa del oleaje (H_{m0}), que representa la energía presente del oleaje en un punto mediante la expresión (Lashley, 2021):

$$H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{\int E(f)df} \quad (1)$$

Donde $E(f)$ es el espectro de la serie de tiempo que se integra dentro un dominio de frecuencias que contengan una cantidad de energía relevante.

- Disipación y vorticidad

Para una interpretación más exhaustiva de los resultados de una modelación de corrientes de resaca es importante considerar variables que se relacionen más con la dinámica del problema, como los mapas de vorticidad y disipación.

La disipación de energía es uno de los procesos más relevantes de la zona de rompientes, ya que el oleaje al asomarse, alcanza un límite y se desestabiliza, produciéndose el rompimiento. En el caso de este proyecto, la disipación fue calculada en su forma promediada en el tiempo (\bar{D}), que consiste en calcular la tasa de disipación local D para cada instante de tiempo y luego promediarlos en el tiempo, tal que:

$$= \frac{-1}{c\bar{h}} \cdot \left(\frac{\partial F_t}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} \right) \quad (2)$$

Donde c es la celeridad, \bar{h} es la profundidad promedio en el tiempo, F_t es la tasa de cambio local, y F_x y F_y son los flujos de energía en x e y respectivamente, definidos como:

$$F_t = g\eta^2 + h \frac{u^2+v^2}{2} \quad (3)$$

$$F_x = gh\eta u + hu \frac{u^2+v^2}{2} \quad (4)$$

$$F_y = gh\eta v + hv \frac{u^2+v^2}{2} \quad (5)$$

Donde u y v corresponden a las velocidades promediadas en la vertical de cada punto, h la profundidad y η la posición de la superficie libre (Suarez, 2014).

Por otro lado, la vorticidad (ω) corresponde a gradientes de velocidades en diferentes direcciones y se forma por la acción de corrientes generadas por el oleaje en la zona de rompientes. En el caso de las corrientes de resaca es relevante el análisis de la vorticidad, definida como:

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6)$$

Para este estudio, al igual que la disipación, los resultados son mostrados promediados en el tiempo para analizar los patrones generales dentro del dominio.

Por último, existe una ecuación de vorticidad promediada en el tiempo, que en este proyecto se utilizó para analizar cada término en cuanto a la física que representa (Suarez, 2014).

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{\omega} = \nabla \times (\bar{D} e_k) \cdot e_z - \nabla \cdot (\bar{\omega} \bar{u}) - \beta \bar{\omega} \quad (7)$$

Donde \bar{u} es la velocidad en la dirección x promediada en la vertical y en el tiempo y β es el coeficiente de fricción linealizado.

La ecuación muestra que la variación temporal de la vorticidad promedio depende de cuatro términos relevantes. El primer término $A_\omega = \bar{u} \cdot \nabla \bar{\omega}$ representa al término de advección de la vorticidad, luego $P_\omega = \nabla \times (\bar{D} e_k) \cdot e_z$ corresponde a la producción de vorticidad, el tercer término $M_\omega = \nabla \cdot (\bar{\omega} \bar{u})$ corresponde a la difusión de vorticidad a la escala del oleaje, por último, el término $F_\omega = \beta \bar{\omega}$ representa la disipación por fricción de la vorticidad (Suarez, 2014).

• RESULTADOS

En esta sección se resumen los principales resultados del proceso metodológico presentado en la sección Metodología, realizando análisis en cada uno para un mayor entendimiento de las corrientes de resaca y sus implicancias.

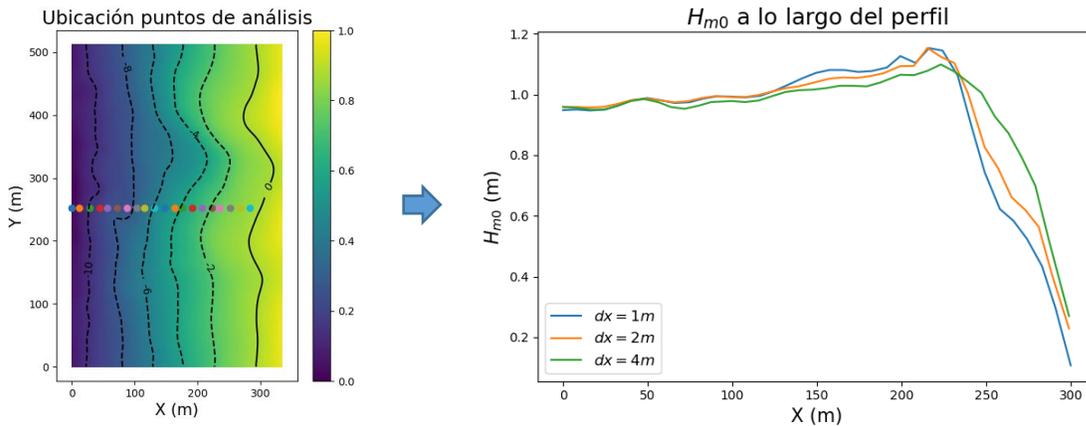
- Análisis de sensibilidad de la resolución espacial

Dentro de las variables de decisión en los modelos numéricos, la resolución tanto espacial como temporal cobran un papel muy relevante, ya que los resultados pueden verse alterados cuando uno la cambia. Cuando la resolución no es suficientemente alta, los resultados pueden no estar representando fielmente los fenómenos que se desean modelar, pero, a su vez, una resolución muy alta puede significar costos computacionales muy elevados y a veces innecesarios. Por esto analizar el impacto de la resolución en los resultados es un ejercicio importante para poder evaluar la modelación de CROCO de las corrientes de resaca e identificar una resolución mínima para representar de buena manera el fenómeno.

Para este análisis de sensibilidad se tomó la batimetría generada para la playa de Las Cruces y se crearon 3 grillas de diferentes resoluciones espaciales; 4, 2 y 1 metro de resolución espacial. Para cada simulación se utilizó la misma condición de borde de oleaje, correspondiente a un espectro Jonswap de altura significativa $H_{m0} = 1m$, periodo peak de $T_p = 11s$, $\gamma = 3.3$ y fase aleatoria (pero las mismas fases para los 3 casos) con una dirección perpendicular a la línea de costa. Se tomó un paso de tiempo de los resultados de 2 segundos y un tiempo total de simulación de 30 minutos, en los que se utilizaron los últimos 20 minutos de cada simulación para evitar distorsión de los resultados en la propagación del oleaje.

En la figura 6 se tomó como referencia un perfil *cross-shore* al centro del dominio para analizar la evolución de la altura significativa de cada una de las simulaciones con diferentes resoluciones espaciales. En todos los casos se ve un claro asomeramiento del oleaje a medida que se acerca a la línea de costa, lo que es consistente con la física del oleaje, y luego tiene un punto de rompimiento alrededor de $x = 230m$, en donde el oleaje comienza a disipar energía. Se puede apreciar que la disipación de energía es más rápida en el caso de resolución más alta, mientras que, con menor resolución espacial, la disipación ocurre más lento.

Figura 6: Comparación perfil de altura significativa entre diferentes resoluciones espaciales.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en la tabla 1 se pueden apreciar otros parámetros del oleaje del perfil tomado en la figura 6 que se consideran relevantes al momento del análisis; que son la ubicación del punto de rompimiento, la pendiente de disipación de energía luego del rompimiento y el asomeramiento máximo desde el borde del dominio.

Tabla 1: Valores de variables relevantes del oleaje según diferentes resoluciones espaciales.

Resolución	Ubicación punto de rompimiento (m)	Pendiente de disipación (m/m)	Asomeramiento máximo (m)
4 metros	223,15	0,0109	0,14
2 metros	215,18	0,011	0,194
1 metro	216,18	0,0125	0,204

De la tabla 1 se puede apreciar que el punto de rompimiento y el asomeramiento máximo son muy dependientes de la resolución escogida en el modelo.

Tomando en cuenta el análisis de estos resultados, se puede decir que una resolución espacial óptima para el modelo es de 2 metros, ya que corresponde a una resolución en la que los resultados comienzan a converger de manera significativa y no posee un costo computacional muy elevado. Sin embargo, si se quiere modelar con mayor detalle el dominio, sería necesario considerar una resolución de 1 metro. La resolución de 4 metros no resultó ser muy diferente a la de mejores resoluciones, por lo que sería muy útil si se quiere utilizar para casos donde se necesite una aproximación rápida de los resultados.

- Corrientes de resaca

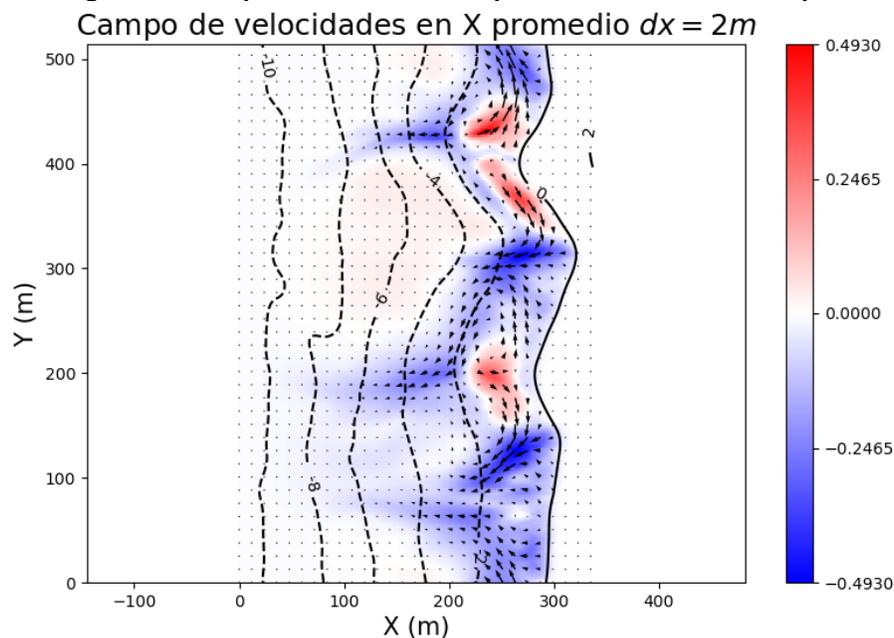
Para el análisis de las corrientes de resaca se tomaron los resultados de la grilla de 2 metros de resolución, ya que correspondió tener un buen desempeño modelando la dinámica del oleaje.

Para la evaluación de las corrientes de resaca hay que tomarlas por su definición, es decir, que al graficar un mapa de las velocidades perpendiculares a la línea de costa (u) se vean unos “canales” de velocidades negativas saliendo de la zona de rompiente hacia el mar adentro.

En la figura 7 se muestra un mapa de velocidades en la dirección perpendicular a la costa y se pueden apreciar claramente 3 corrientes de resaca dentro del dominio; en $x = 80m$, $x = 200m$ y $x = 410m$ aproximadamente. La corriente que se aprecia mejor es la ubicada en $x = 410m$, que alcanza velocidades mayores a los 0,3 m/s (para un oleaje poco energético como el que estamos modelando), tiene dimensiones cercanas a los 100 metros de largo y 10 metros de ancho. Las otras dos corrientes de resaca se ven más difusas debido a que se encuentran relativamente cerca, por lo que podrían estar interactuando entre ellas.

Otro punto importante es la relación de la ubicación de las corrientes con la batimetría, ya que las corrientes son más propensas a formarse en aquellos lugares donde el oleaje es forzado a girar, por ejemplo, en la figura 7 se muestra el campo vectorial de velocidades, y los puntos A y B de la línea de costa juegan un rol de separadores de flujos hacia arriba y abajo, lo que genera vorticidad en el flujo y forma estructuras como las corrientes de resaca. Esto se analizará en mayor detalle en la siguiente sección.

Figura 7: Campo de velocidades promediadas en el tiempo.



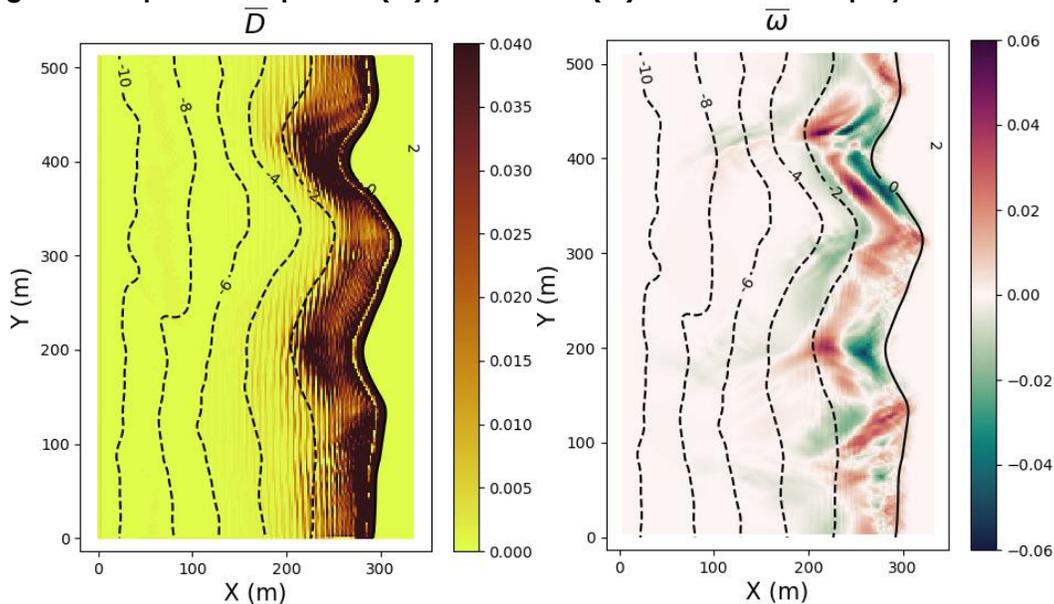
Fuente: Elaboración propia.

- o Disipación y vorticidad

Como se presentó en la sección Metodología, existen formas de cuantificar la disipación y la vorticidad teniendo los resultados de la modelación numérica. En primer lugar, utilizando la ecuación (2) se calculó la disipación y luego se promedió en el tiempo para graficar el mapa de

disipación promedio. Luego, se utilizó la ecuación (6) para calcular la vorticidad y se promedió en el tiempo al igual que la disipación. Se puede observar en la figura 8 que los patrones de disipación y vorticidad se encuentran en las mismas zonas y están representados por órdenes de magnitud similares, concordante con que la disipación es el motor de la vorticidad (Bonneton et al., 2010).

Figura 8: Mapas de disipación (\bar{D}) y vorticidad ($\bar{\omega}$) de modelación playa Las Cruces.



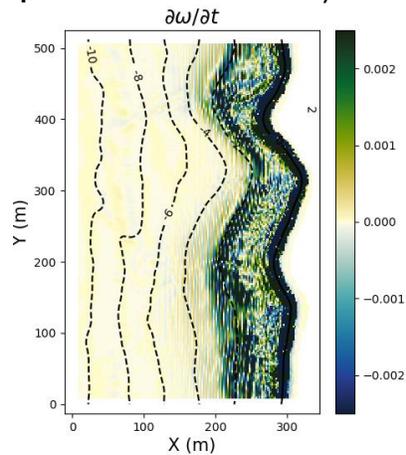
Fuente: Elaboración propia.

La otra manera de analizar los resultados es evaluando la ecuación (7) y cada uno de sus términos y comparando sus valores con los procesos físicos que ocurren en la costa. En la figura 9 se muestra el valor de $\partial \bar{\omega} / \partial t$ y en la figura 10 se muestran mapas para cada término de la ecuación de vorticidad.

Analizando ambas figuras, se puede apreciar que los valores de $\partial \bar{\omega} / \partial t$ tienen el mismo orden de magnitud que sus términos, pero se ve influenciado por los altos valores del término de producción en la costa y el de difusión por oleaje en la zona de rompiente. De la figura 10 se puede desprender que el segundo término P_{ω} muestra que la producción de vorticidad se lleva a cabo luego del rompimiento del oleaje que es cuando se concentra la disipación de energía. Luego, el término M_{ω} muestra la difusión de la vorticidad, que ocurre como un proceso natural asociado al movimiento oscilatorio del oleaje. El término F_{ω} muestra que existe una gran disipación de vorticidad por fricción y esta se concentra en las zonas altas de la playa donde las profundidades son pequeñas, debido a que, por la poca profundidad del flujo, los vórtices se disipan con mayor rapidez gracias a la fricción.

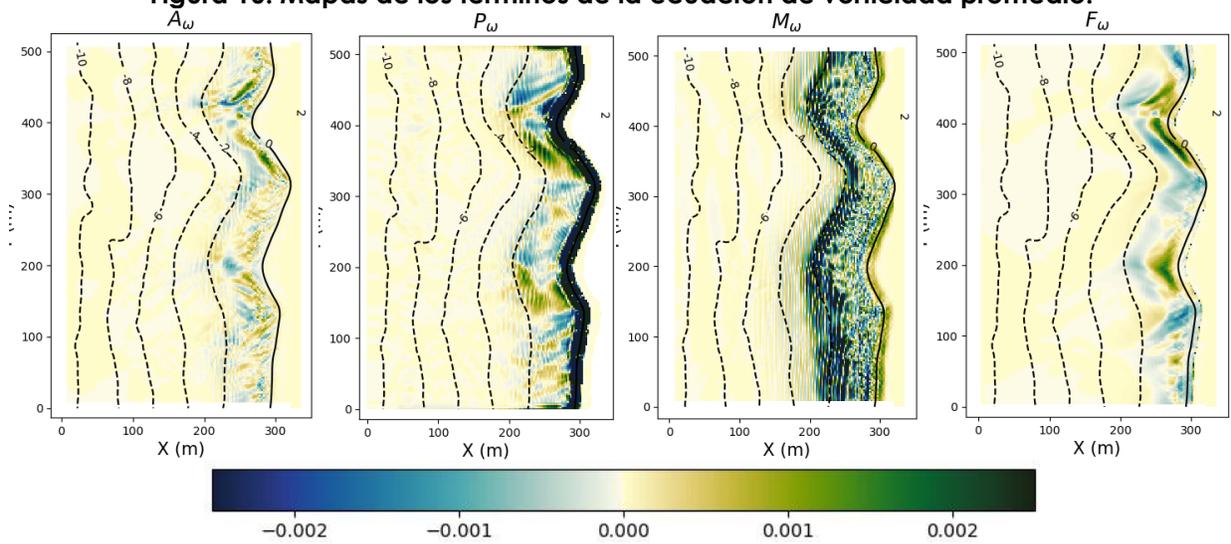
Además, se puede notar que todos los términos se activan cerca de la curva de nivel de los 2 metros de profundidad, lo que muestra que el proceso de la vorticidad está directamente relacionado con el rompimiento del oleaje y su desarrollo hasta que llega a la orilla.

Figura 9: Mapa de variación temporal de vorticidad $\partial \bar{\omega} / \partial t$ de modelación playa Las Cruces.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10: Mapas de los términos de la ecuación de vorticidad promedio.



Fuente: Elaboración propia.

- **CONCLUSIONES**

CROCO se caracteriza por ser un programa amigable con el usuario, de fácil acceso y con múltiples funciones para representar cualquier sistema marino. Sin embargo, para el modelado de cualquier sistema, una etapa clave son la confección de las condiciones de borde del modelo. En este caso la batimetría y el clima de oleaje fueron las condiciones de borde principales que impactaban de manera significativa en los resultados del modelo y requiere de una actualización frecuente en la zona de rompientes para efectos operacionales.

Gracias a la recopilación de información y análisis de bibliografía se notó la importancia del modelado de las corrientes de resaca, tanto por el mejor entendimiento de dichos procesos en las zonas de rompientes como por los peligros naturales asociados a la formación de estas estructuras.

Las corrientes de resaca pudieron apreciarse en los resultados de los modelos ejecutados, lo que indica una capacidad real del programa de reproducir estas estructuras de flujo. Si bien las corrientes de resaca pueden alcanzar valores altos de velocidad (1 a 2 m/s), en los casos modelados no superó los 0,3 m/s, pero es debido a que los casos modelados fueron con condiciones comunes de oleaje. Sin embargo, con condiciones de oleaje más extremas las corrientes podrían verse acentuadas.

Uno de los resultados más importantes fue la estimación de una resolución espacial óptima de modelado, que permitiera una modelación realista y un buen desempeño computacional a la vez. La resolución óptima estimada para el caso de Las Cruces fue de 2 metros, resolución que puede ser utilizada en posteriores modelaciones.

Los mapas de disipación y vorticidad dejaron en evidencia que los procesos de transporte de cantidad de energía y momentum no lineales del oleaje están presentes en la zona de rompientes y dominan la dinámica del flujo promediado, formando estructuras como las corrientes de resaca. Además, se notó una importante semejanza entre los patrones de ambas variables, lo que significa que ambos fenómenos están correlacionados.

REFERENCIAS

Beven, K. 1995. Linking parameters across scales: Sub-grid parameterizations and scale dependent hydrological models. *Hydrological Processes*, 9, 507-525.

Bonneton P., Bruneau N., Castelle B., Marche F 2010. Large-scale vorticity generation due to dissipating waves in the surf zone. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - B*, 13 (4) : 729-738.

Castelle, B., Scott, T., Brander, R., & McCarroll, R. 2016. Rip current types, circulation and hazard. Elsevier, 1-21.

Cienfuegos, R., Almar, R., Michallet, H., Barthémely, E., & Duarte, L. 2013. An experimental and numerical investigation on random wave propagation over a mild slope beach: Infragravity wave dynamics under quasi-resonant conditions for short-wave group velocity and long-wave celerity.

Cuadra, L. 2022, abril 21. BuscaOlas. Retrieved from <https://buscaolas.cl/articulo/corriente-de-resaca-un-enemigo-silencioso-para-los-surfistas>

DGA, 1995. Hidrodinámica Preliminar del Lago Villarrica. Departamento de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile.

Holthuijsen, L. 2007. WAVES IN OCEANIC AND COASTAL WATERS. CAMBRIDGE University Press. Retrieved from http://www.sisal.unam.mx/labeco/LAB_ECOLOGIA/OF_files/82571738-Waves-in-Oceanic-and-Coastal-Waters.pdf

Johnson, C. 2020. SeaGrant California. Retrieved from <https://caseagrant.ucsd.edu/our-work/recursos/3-mitos-sobre-las-corrientes-de-resaca>

Linsley, R.K., y J.B. Franzini. 1967. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. CECSA, México.

Marchesiello, P., Auclair, F., Debreu, L., McWilliams, J., Almar, R., Benschila, R., & Dumas, F. 2021. Tridimensional nonhydrostatic transient rip currents in a wave-resolving model.

Marchesiello, P., Benschila, R., Almar, R., Uchiyama, Y., McWilliams, J., & Shchepetkin, A. 2015. On tridimensional rip current modeling.

Moulton, M., Dusek, G., Elgar, S., & Raubenheimer, B. 2017. Comparison of Rip Current Hazard Likelihood Forecasts with Observed Rip Current Speeds.

Suarez, L. 2014. Surf zone boundary layer and 2D large scale hydrodynamics.

USACE. 1988. WQRRS: Water Quality for River-Reservoir Systems. Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers, San Diego, California.

Yang, C.T. 1996. Sediment Transport: Theory and Practice. McGraw-Hill, Nueva York.