



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

UNA PRIMERA APROXIMACIÓN EN LA EFICIENCIA HIDRAULICA DE UN PROTOTIPO DE CAMPO DE ALGAS

JEAN PIERRE TOLEDO ALVARADO ¹

FELIPE HURTADO FERREIRA ²

PATRICIO WINCKLER GREZ ^{3,4,5}

RESUMEN

El Prototipo de Campo de Algas (PCA) con *Macrocystis pyrifera* tiene un notable potencial para disipar el oleaje en las costas de Chile, con una eficiencia hidráulica estimada entre el 10% y el 30%. Esta capacidad de disipación depende tanto de los parámetros estructurales del PCA como de las características del oleaje incidente. Para evaluar dicha eficiencia, se llevaron a cabo simulaciones utilizando modelos numéricos complementarios. Primero, se empleó un modelo de interacción fluido-estructura (ANSYS Fluent) para analizar la respuesta de las algas, tanto individualmente como en grupo, lo que permitió determinar los coeficientes de arrastre rígidos en cada caso. Estos coeficientes se utilizaron como datos de entrada para el modelo hidrodinámico XBeach, que fue fundamental para estudiar el rango de disipación en diferentes configuraciones de campos de algas y evaluar la factibilidad técnica de la densidad de cultivo del PCA. Esta primera aproximación a la eficiencia hidráulica de Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) proporciona una base sólida para expandir, profundizar y analizar los diversos parámetros que influyen en la disipación del oleaje. El siguiente paso en esta investigación será evaluar los coeficientes de arrastre en condiciones de flexibilidad, lo que permitirá ajustar y escalar la solución con mayor precisión. Es importante destacar que el PCA tiene el potencial de ser implementado a gran escala en Chile, lo que podría conducir, a mediano o largo plazo, a la implementación de protecciones híbridas en las costas del país. Estas protecciones serían clave para mitigar los efectos adversos de las marejadas frecuentes e intensas, contribuyendo así a la protección costera de manera sostenible y eficiente.

¹ Doctor(c) en Acuicultura. Programa Cooperativo. Universidad de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad Católica del Norte, jean.toledo@pucv.cl

² Escuela Ciencias del Mar. Pontificia Universidad de Valparaíso, felipe.hurtado@pucv.cl

³ Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. patricio.winckler@uv.cl

⁴ Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR)

⁵ Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN)

1 INTRODUCCIÓN

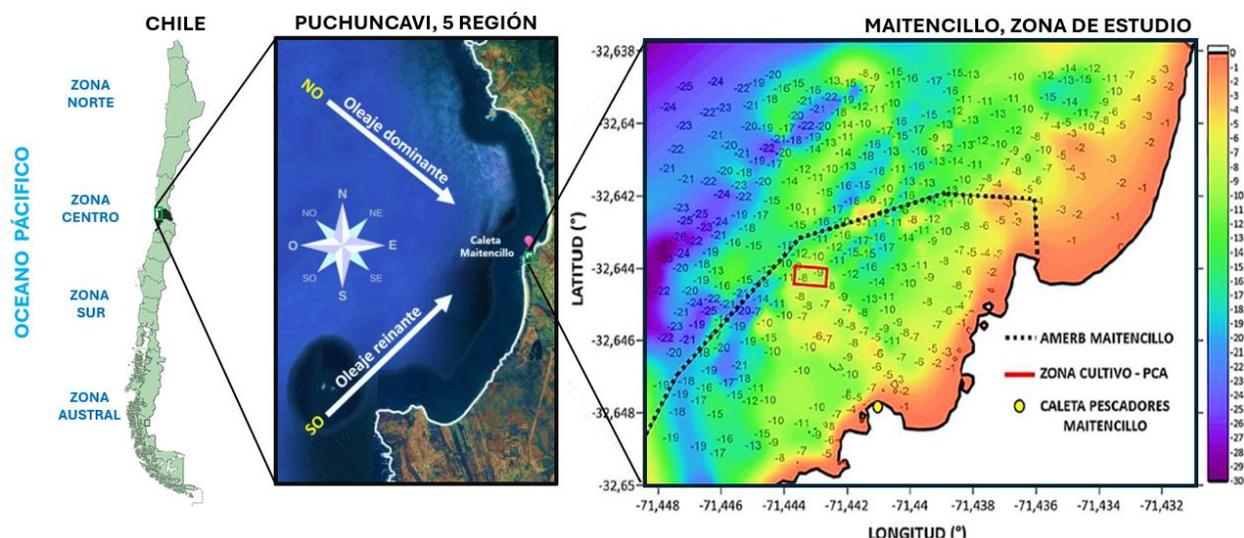
La zona costera de Chile está siendo afectada por eventos extremos de oleaje cada vez son más frecuentes e intensos (Winckler et al. 2020). Este fenómeno ha exacerbado la erosión costera (Martínez et al. 2022), tendencia que se mantendrá durante el presente siglo (Winckler et al. 2023). En la zona central de Chile, por ejemplo, las marejadas se incrementaron de 5 por año en 1950 a 20 por año en el 2015 (Martínez et al. 2017), ocasionando cambios sustantivos en playas e infraestructura (Winckler et al. 2017). Este contexto pone en cuestionamiento la eficiencia de las tipologías que se basan en su rigidización mediante rompeolas, espigones y diques exentos. En este contexto, las Soluciones que están basadas en la Naturaleza permiten restaurar, preservar y mejorar las costas y los servicios ecosistémicos (Ward et al. 1984, Fonseca y Cahalan 1992, Nepf 1999, Méndez y Losada 2004, Bianciardi et al. 2023). En décadas recientes se ha estudiado el efecto de la vegetación acuática sobre las olas y corrientes, debido a que aumenta la resistencia al flujo y reduce su velocidad (Kadlec 1990, Nepf 1999, Shi et al. 1995, Wu et al. 1999). La vegetación amortigua el efecto de las marejadas (Loder et al. 2009, Sheng et al. 2012, Wamsley et al. 2010) promoviendo la sedimentación y la retención de partículas suspendidas (López y García 1998, Nepf y Ghisalberti 2008, Tsujimoto 2000). Existen numerosos estudios que cuantifican la disipación de energía del oleaje en presencia de vegetación, utilizando una variedad de métodos numéricos y analíticos (Wei Cheng y Cox 2015). Por ejemplo, Kobayashi et al. (1993) derivaron una solución analítica para la atenuación de ondas monocromáticas, mostrando que la altura de las olas decae exponencialmente en el campo de vegetación. También se ha estudiado la relación de sumersión (Anderson y Smith 2014, Garzón et al. 2019, Méndez y Losada 2004) y la biomasa (Maza et al. 2015), pero los resultados no son consistentes, sugiriendo que otros parámetros pueden también ser importantes. El aumento de altura en la vegetación, por ejemplo, aumenta la fuerza de arrastre y la disipación de energía (Méndez and Lozada 2004). Pablo et al. (2016) demostraron que la flexibilidad de las algas puede afectar el potencial para atenuar las olas cuando las velocidades orbitales son bajas. También se ha demostrado que el coeficiente de arrastre en la vegetación flexible se reduce entre un 30% (Van Veelen et al. 2020) y 50% (Maza et al. 2013). Alternativamente, Riffe et al. (2011) evaluaron una reducción del 50 % en la fuerza de arrastre para la vegetación flexible en un estudio de campo. Se ha observado que un bosque de algas como *Laminaria hyperborea*, con 25 plantas por m² reduce significativamente la energía de las olas (Mork, 1995) y que densos bosques de algas de *Macrocystis pyrifera* (kelp gigante) reducen significativamente las corrientes (Jackson 1997, Gaylord et al. 2007, Rosman et al. 2007) y la amplitud del oleaje (Jackson 1984, Rosman et al. 2007). Estas algas pueden llegar a medir de 60 hasta 70 m de largo y crecer cerca 50 cm diarios. Estudios recientes demostraron que un bosque de *Macrocystis pyrifera* de 120 m² y 8 estipes por m² en California reduce un 7% la energía del oleaje (Elsmore et al., 2024).

Este estudio busca evaluar la viabilidad técnica de un Prototipo de Campo de Algas (PCA) para atenuar el oleaje y reducir la erosión costera utilizando una especie de macroalga local (*Macrocystis pyrifera*). La investigación se adscribe a la filosofía de estudiar sistemas vivos (Bianciardi et al. 2023) con el fin de potenciar el uso de protecciones híbridas. Con este prototipo pretendemos llenar un vacío donde la literatura se centra en costas tectónicamente estables y climas de oleaje suaves, que difieren sustancialmente de las condiciones del litoral chileno. El estudio se enmarca en el proyecto Fondef ID23 | 10078, que busca desarrollar soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para disipar el oleaje combinando modelos numéricos, modelos físicos y estudios de campo para evaluar la eficiencia hidráulica del PCA, es decir, su capacidad para disipar la energía del oleaje.

2 SITIO DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al Área de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos (AMERB) de la Caleta de Maitencillo, ubicada en la zona central de Chile (Figura 1). En este sitio, se llevan a cabo actividades de acuicultura experimental con el objetivo de evaluar las capacidades de crecimiento de *Macrocystis pyrifera* y verificar la eficiencia hidráulica del PCA. El oleaje reinante proviene del suroeste, mientras y el oleaje dominante desde el noroeste, lo que indica que la Caleta está expuesta a oleaje altamente energético (Beyá et al., 2016). El PCA se instalará en el costado noroeste del AMERB, a profundidades de entre 8 y 9 m. Estas características definen las condiciones iniciales y de borde para los modelos numéricos que se utilizarán en el análisis. En esta primera fase, se desarrollaron modelos simplificados con el propósito de dimensionar el PCA y evaluar su eficiencia hidráulica. En etapas posteriores, los modelos serán calibrados y validados con datos in situ, proporcionando una mayor robustez al estudio.

Figura 1. Batimetría de la AMERB y ubicación del PCA.



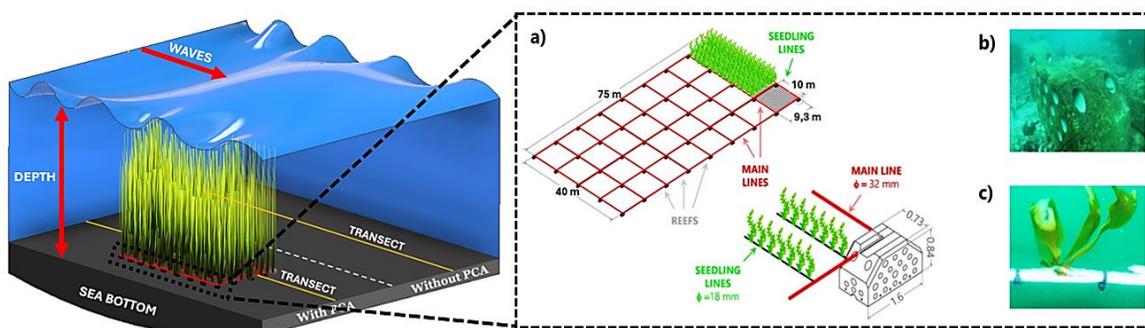
En sitios expuestos tanto en la zona norte como en la zona sur de Chile, la *Macrocystis pyrifera* suele tener un diámetro de sujeción de ~25 cm, con solo 3 a 4 estipes por alga, sin variaciones temporales en su abundancia (Buschmann, 2004). En la zona de estudio, la AMERB presenta una densidad natural de 0.59 unidades por m² de *Macrocystis pyrifera* (IFOP 2016), una densidad relativamente menor en comparación con otras áreas estudiadas, lo que la convierte en un punto de interés particular para esta investigación.

3 PROTOTIPO DE CAMPO DE ALGAS (PCA)

El PCA cubre una superficie de 0,3 hectáreas y está compuesto por una estructura de soporte (Figura 2a) fija al fondo marino mediante una red de arrecifes artificiales tipo nicho (AATN) (Figura 2b). Esta estructura incluye líneas estructurales de polipropileno y líneas secundarias donde se cultivan plántulas de huiro flotador, *Macrocystis pyrifera* (Figura 2c), una la especie está presente en las zonas central, sur y austral de Chile (Figura 1). Los AATN, fabricados con hormigón inocuo, contienen agujeros cilíndricos diseñados para crear nichos ecológicos (Toledo et al., 2020). En

este estudio se estima una tasa de supervivencia del 40% en el sitio, lo que resultaría en una densidad de 10 unidades/m², superior a las densidades naturales en zonas expuestas. Esta configuración tiene como objetivo reducir la altura del oleaje entre un 10% y un 30%.

Figura 2. Prototipo Campo de Algas.



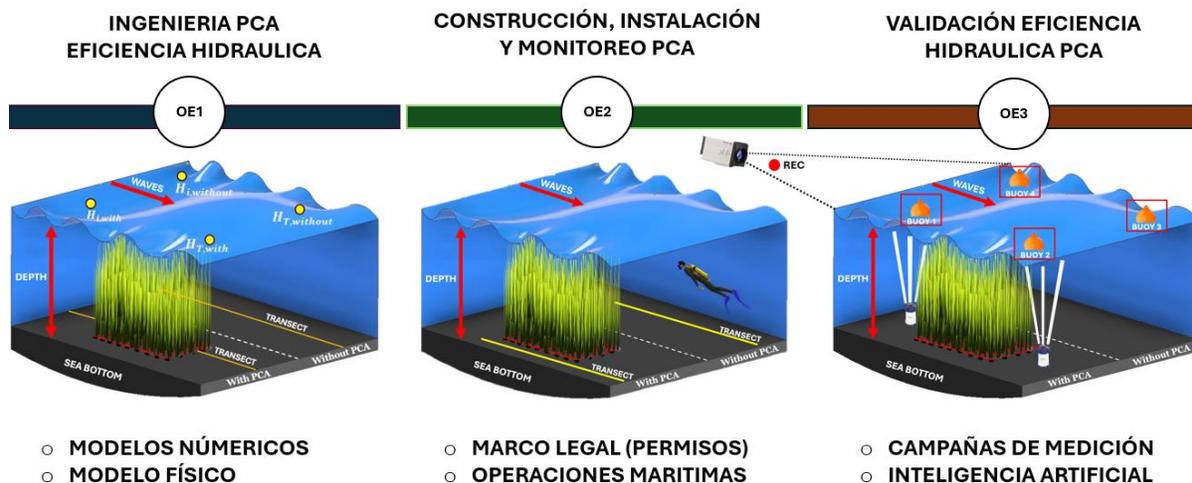
La estructura morfológica de la *Macrocystis pyrifera* se compone de un disco de fijación o rizoide masivo que alcanza hasta 40 cm de diámetro y 35 cm de altura, estipes largos, cilíndricos, flexibles y de ramificación dicotómica, además de láminas que surgen de los estipes. Estas láminas poseen una estructura llamada aerocisto que le otorga flotabilidad por encontrarse llena de aire (Plana et al. 2007). Esta especie provee lugar de refugio, desove y alimento a una variada fauna de invertebrados y peces; además, es muy importante para desacelerar la desoxigenación y acidificación de los océanos (Farias et al. 2019). Mora et al. (2020) demuestran que a través de imágenes satelitales y algoritmos se puede proporcionar una forma simple, confiable y económica de detectar y monitorear bosques de *Macrocystis pyrifera*, que cubren áreas mayores a una hectárea y en regiones con fluctuaciones de marea menores a 4 m.

4 METODOLOGÍA

En esta primera etapa del estudio se utilizaron dos modelos numéricos complementarios y un modelo físico a escala reducida 1:40 (Figura 3, OE1); en este documento sólo presentamos resultados de la modelación numérica. En primer lugar, se aplicó el modelo de interacción fluido-estructura ANSYS Fluent para estimar los coeficientes de arrastre rígidos de *Macrocystis pyrifera*. Estos coeficientes fueron introducidos en el modelo XBeach, el cual permitió estimar la eficiencia hidráulica del PCA.

En etapas futuras, se instalará el PCA en Maitencillo (Figura 3, OE2) y se medirá el oleaje utilizando un sistema basado en inteligencia artificial de bajo costo (Figura 3, OE3), junto con sensores de oleaje convencionales. Simultáneamente, se monitoreará el crecimiento de las macroalgas y los procesos de asentamiento natural y sucesión ecológica en torno a los arrecifes. Para la instalación del PCA, se ha obtenido el certificado de la Autoridad Marítima de Quintero A-N°1704760, el cual asegura que la estructura no interfiere con la seguridad y libre navegación, accesibilidad a rampas, muelles, atracaderos, lugares de fondeo, varaderos de embarcaciones o puertos. Este certificado fue presentado a la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura para la obtención del permiso de acuicultura experimental R. EX N°1605. La obtención de este marco legal es crucial para la viabilidad de proyectos marítimos, marcando un hito significativo que permite la implementación y escalabilidad del PCA.

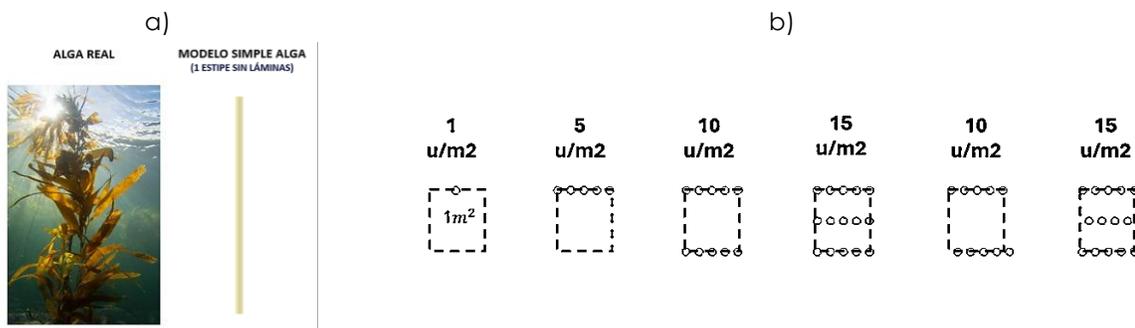
Figura 3. Etapas para validar la eficiencia hidráulica.



Modelo de interacción fluido-algas individuales (ANSYS Fluent)

A la fecha no se dispone de métodos de predicción fiables para determinar el coeficiente de arrastre de estructuras complejas como la *Macrocystus pyrifera*. Numerosos estudios han demostrado que la exactitud de un modelo para simular la interacción oleaje-vegetación depende en gran medida de la determinación del coeficiente de arrastre (C_d), y que su cuantificación constituye un desafío pendiente (Chen et al. 2019, Ma et al. 2013, Wang et al. 2021b). Por ende, para caracterizar la interacción fluido-algas se utilizó el software ANSYS Fluent, modelo que permite generar soluciones aproximadas a las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos (Barman 2016, Zawawi et al. 2018, Aubry et al. 2005). Para estudiar la *Macrocystis Pyrifera* se utilizó un modelo simple que representa la compleja estructura del alga mediante un grupo de cilindros equivalentes (Figura 4). El grupo representa una primera aproximación para calcular coeficiente de arrastre de una densa masa de *Macrocystus pyrifera* en función de la densidad, diámetro y altura de la vegetación. Dado existe insuficiente información en la literatura sobre el rol de estas variables en la eficiencia hidráulica de esta especie, de recurrió a un análisis de sensibilidad para cubrir los rangos esperables.

Figura 4. a) Simplificación Alga real b) Configuraciones para calcular el coeficiente de arrastre.



La fuerza de arrastre total de la interacción fluido-cilindro se calculó como:

$$F_d = \int_S (\tau_w + pn) \cdot e_x dA \quad (1)$$

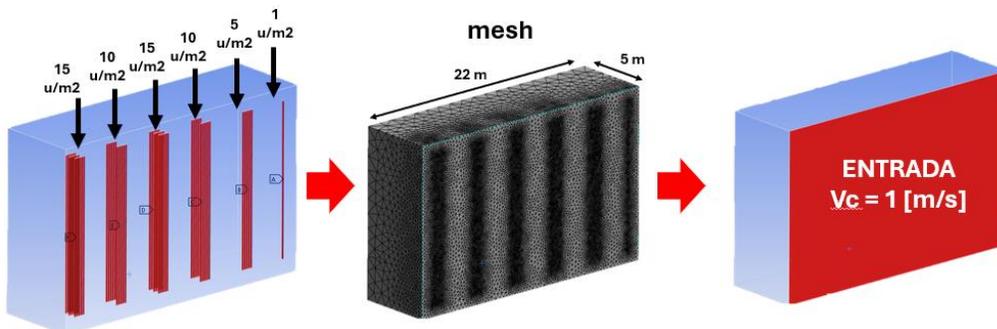
Donde S es la superficie del objeto sobre la que se realiza la integración, τ_w es la tensión cortante en la pared, p es la presión local en la superficie del objeto, n es el vector normal a la superficie del objeto, e_x es el vector unitario en la dirección del flujo y dA es el área diferencial de la superficie del objeto. Para el cálculo del coeficiente de arrastre, $C_d = F_D / \left(\frac{1}{2} \rho A u^2\right)$, donde u es la velocidad del flujo perturbada por el objeto, $u_{perturbada} = u_{promedio} + u'$ y $u' = \sqrt{2k}$ es la magnitud de las fluctuaciones turbulentas debidas a la presencia del objeto, donde k es la energía cinética turbulenta del flujo cerca del objeto. Este valor se calcula en cada punto alrededor del objeto al resolver las ecuaciones de Navier-Stokes acopladas con las ecuaciones de transporte de k - ω .

Se simularon 64 casos para realizar un análisis de sensibilidad del coeficiente de arrastre ($C_d \text{ bulk}$) en función del diámetro de la vegetación ($\phi = 30, 60, 90, 120 \text{ mm}$), la altura de la vegetación ($h_v = 1, 4, 8, 12 \text{ m}$) y la densidad de la vegetación ($N = 1, 5, 10, 15 \text{ u/m}^2$). El coeficiente de arrastre total del grupo ($C_d \text{ bulk}$) de cilindros se asumió como la sumatoria de los coeficientes de arrastre individuales de cada cilindro.

$$C_{d1} \quad C_{d2} \quad C_{d3} \quad C_{d4} \quad C_{dn} \quad C_{d \text{ bulk}} = \sum_{i=1}^n C_{di} = C_{d1} + C_{d2} + C_{d3} + C_{d4} + C_{dn}$$

Los modelos de algas están inmersos en una malla numérica que representa el agua cuya configuración se presenta en la Figura 5. En una de las caras del dominio se impone un flujo de 1 m/s. Con esta velocidad y el diámetro de los cilindros, se obtiene un número de Reynolds $Re = uD/v > 1 \times 10^4$, que representa un estado turbulento donde el coeficiente de arrastre es aproximadamente constante. Hui et al. (2018) indican que el coeficiente de arrastre de la vegetación ante corrientes, oleaje o combinaciones de ambas varía con el número de Reynolds, siendo relativamente bajo y estable para un $Re > 1 \times 10^4$. Para la vegetación flexible se presentan rangos de $C_d < 1$ y 5, y en la rígida entre $C_d = 1$ y 8.

Figura 5. Configuración de la malla utilizada en Ansys Fluent para simular algas.



Cantidad Nodos	142.919	Tipo de entrada	Velocity - inlet
Cantidad Elementos	821.722	Velocidad	1 m/s (5% turbulence)
Densidad Fluido	Agua - 1000 kg/m ³	Tipo de salida	Pressure outlet (0 Pa)
Viscosidad Cinemática	0.001003 kg/ms	Modelo de turbulencia	SST k - ω

Modelo disipación oleaje PCA – XBEACH

XBeach es un modelo de código abierto que permite simular procesos dinámicos en costas arenosas, con dominios del orden de kilómetros y en la escala de tiempo de tormentas (2-5 días). El modelo incluye procesos de transformación del oleaje (refracción, shoaling y rotura) y onda larga (generación, propagación y disipación). El análisis se realizó en el módulo surfbeat, gobernado por la ecuación de balance de acción del oleaje:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial C_x A}{\partial x} + \frac{\partial C_y A}{\partial y} + \frac{\partial C_\theta A}{\partial \theta} = \frac{D_w + D_v}{\sigma} \quad (2)$$

Donde $A(x, y, t, \theta) = S_w(x, y, t, \theta)/\sigma(x, y, t)$ representa la acción de oleaje, S_w la densidad espectral de energía de oleaje, C_x y C_y la componente de la celeridad de grupo en los ejes x e y , C_θ la dirección del grupo respecto al eje x , D_w la disipación por rotura, D_v la disipación por vegetación y σ la frecuencia intrínseca del oleaje. La tasa de disipación de energía (promediada en el tiempo por unidad de área horizontal) inducida por la vegetación rígida es calculada con la fórmula de Méndez & Losada (2004), usada en diversos estudios (e.g., Suzuki et al, 2012, Guannel et al. 2015):

$$D_v = \left(\frac{kg}{2\sigma}\right)^3 \frac{\rho C_d b_v N_v \sinh^3(kh_v) + 3\sin(kh_v)}{2\sqrt{\pi} 3k \cosh^3(kh)} H_{rms}^3 \quad (3)$$

Donde k es el numero de onda, C_d bulk es el coeficiente de arrastre de grupo, H_{rms} es la altura de ola cuadratica media, h_v es la altura de la vegetación, h es la profundidad local del agua en la vegetación, b_v es el diametro del tallo de la vegetación y N la densidad de la vegetación.

En el modo no estacionario, Xbeach resuelve el movimiento del oleaje resolviendo la ecuación de acción del oleaje en el tiempo. Esta ecuación resuelve la variación de la envolvente de la onda corta en la escala de grupos usando un modelo de disipación por rotura (Roelvink 1993), y, un modelo de roller (Svendensen 1984) para representar el momentum almacenado en la ola una vez iniciada la rotura. Estas variaciones ejercen una fuerza en la columna de aguas a través de los gradientes de tensores de radiación, originando ondas largas y corrientes que son resueltas por las ecuaciones no lineales de aguas someras (e.g. Phillips 1977). Las ecuaciones de continuidad y momentum se formulan en términos de la velocidad lagrangiana (u^L, v^L), que se define como la distancia que recorre una partícula de agua en un periodo de tiempo. Esta velocidad está relacionada con la velocidad euleriana (u^e, v^e), que se define como la velocidad promediada de la onda corta en un punto fijo:

$$u^L = u^e + u^s, \quad v^L = v^e + v^s \quad (4)$$

Donde u^s y v^s representan la deriva de Stokes en la dirección x e y respectivamente, que se calcula a partir del balance de acción del oleaje, a través su energía espectral (E_w).

$$u^s = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c}, \quad v^s = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c} \quad (5)$$

Como consecuencia, las ondas de infragravedad son expresadas mediante las ecuaciones no lineales de onda larga (depth-averaged Generalized Lagrangian Mean formulation):

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial n}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \quad (7)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

Donde h es la profundidad local, τ_{bx}^E y τ_{by}^E esfuerzos de fricción de fondo, n es el nivel del agua, F_x y F_y son los esfuerzos generados por oleaje, v_h la viscosidad horizontal, f es el coeficiente de efecto Coriolis y F_v la fuerza de arrastre generada por la vegetación:

$$F_v = F_d = 1/2 \rho C_d b_v N u |u| \quad (9)$$

Se simularon 64 casos para realizar un análisis de sensibilidad de los coeficientes de transmisión del oleaje (K_t^W) y de las ondas infragravitatorias (K_t^{IG})

$$K_t^W = \frac{H_t^W}{H_i^W}, \quad K_t^{IG} = \frac{H_t^{IG}}{H_i^{IG}}, \quad (10)$$

Donde los subíndices i y t corresponden a valores antes ($x = 925$ m) y después ($x = 1000$ m) del PCA. Estos coeficientes se evaluaron en función del diámetro, de la altura significativa (H) y período del oleaje incidente (T), densidad de la vegetación (N) con mortalidades de 80% y 60%, profundidad del campo de algas (profundidad media y máxima) y coeficiente de arrastre ($C_{d\ bulk}$) estimado con ANSYS Fluent, parámetro de entrada clave (Wang et al. 2023). Estas las variables se asumen mutuamente independientes y se evalúan cada una dejando los demás constantes. La eficiencia hidráulica se define de la siguiente forma

$$\varepsilon_t^W = (1 - K_t^W) \times 100, \quad \varepsilon_t^{IG} = (1 - K_t^{IG}) \times 100 \quad (11)$$

}

Se realizó el seteo experimental del modelo PCA en Xbeach, evaluando campos de algas para alturas de vegetación de $h_v = 4.0$ y 8.0 m.

$$H_s = \sqrt{2} H_{rms} = 1.414 H_{rms} \quad (12)$$

5 RESULTADOS

Resultados interacción fluido-algas

Mediante ANSYS Fluent se obtuvo el campo de velocidades resultante de la interacción del flujo de agua con diferentes grupos de cilindros que representaban vegetación. De acuerdo con la metodología, se realizaron 64 simulaciones para determinar los coeficientes de arrastre en vegetación rígida equivalente a la *Macrocystis pyrifera*. Los resultados indican que la vegetación con mayor diámetro y densidad tiene un impacto considerable en la velocidad del flujo, reduciendo la velocidad en las áreas adyacentes a la vegetación densa Figura 6. Con ello, el coeficiente de arrastre aumenta significativamente con densidades más altas de vegetación (medidas en unidades por m²), así como con mayores diámetros y alturas (Figura 7).

Figura 6. Campo de velocidades para diferentes densidades, diámetros y alturas de vegetación.

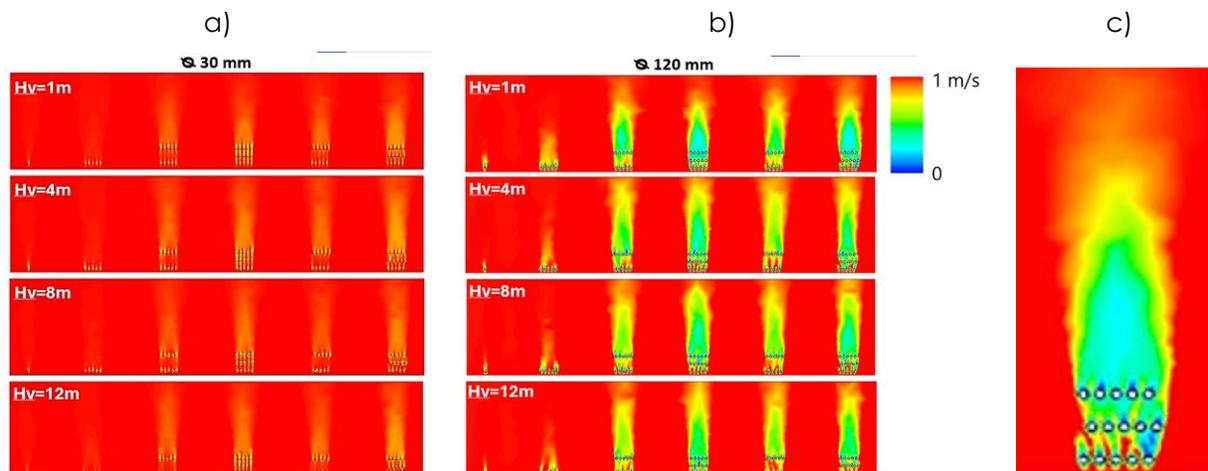
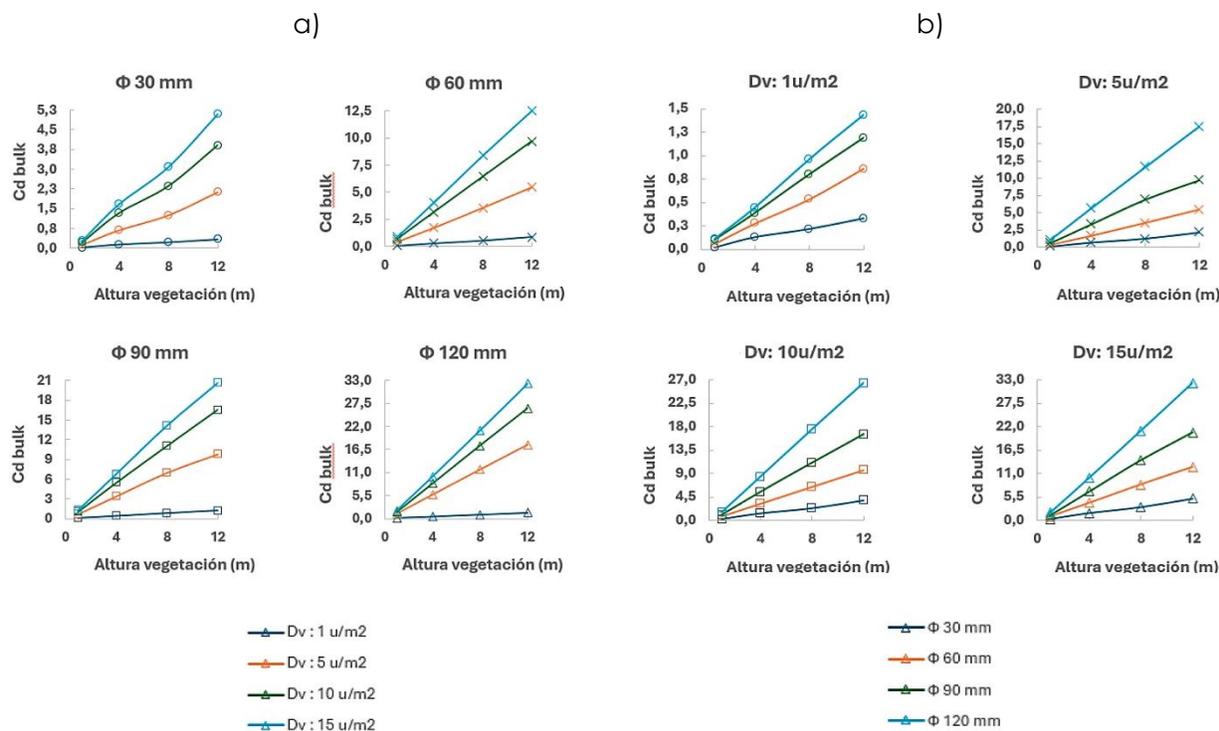


Figura 7. Coeficientes de arrastre en función de la altura, densidad y diámetro de la vegetación. Análisis de sensibilidad para diferentes a) diámetros y b) densidades.



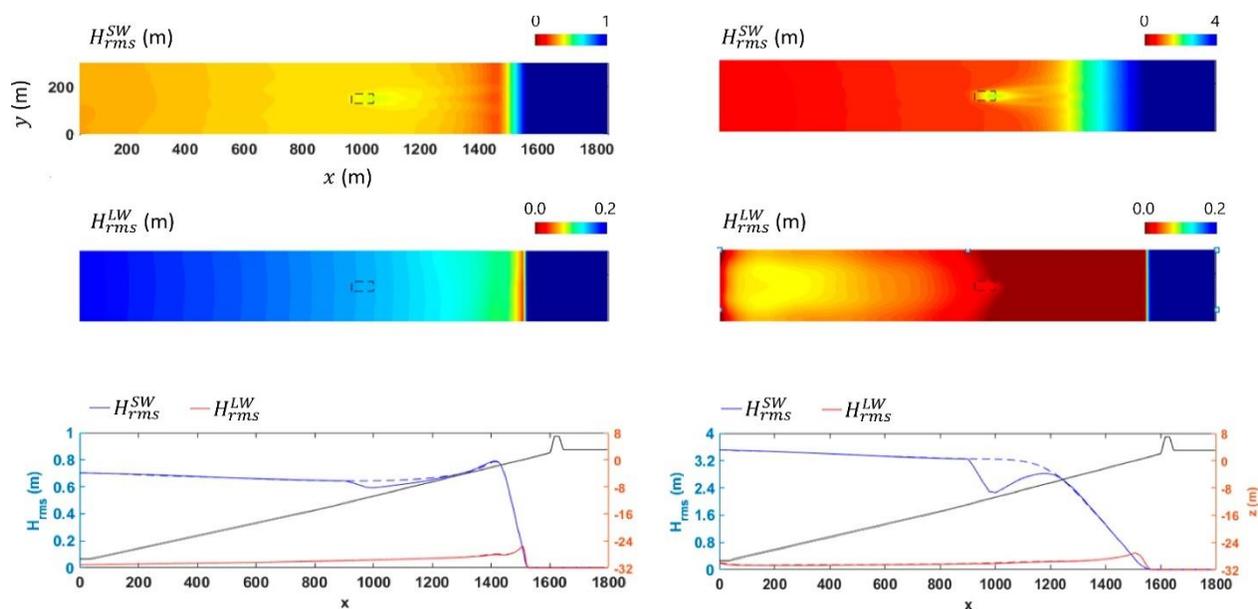
La literatura existente sugiere que los coeficientes de arrastre en vegetaciones rígidas suelen oscilar entre 1 y 8. Sin embargo, no se dispone de información específica para *Macrocystis pyrifera*. Las simulaciones realizadas muestran que, para una densidad de cultivo de 10 unidades por m² y diámetros de 30 mm, el coeficiente de arrastre varía entre 0.4 y 4. Para diámetros de 60

mm, el coeficiente varía entre 1 y 9. Estos rangos coinciden con los valores reportados en estudios sobre otras especies de vegetación y se consideran razonables para su aplicación en el modelo XBeach. No obstante, para diámetros de 90 y 120 mm, los coeficientes de arrastre alcanzan valores máximos entre 20 y 35. Estos valores no son comparables con lo reportado para otras especies. La concordancia de los coeficientes de arrastre para diámetros pequeños con los valores reportados en la literatura para otras especies respalda la validez de estos resultados para otros casos. No obstante, para diámetros mayores es necesario complementar estos resultados con modelos físicos y estudios in situ para validar su aplicabilidad.

Resultados disipación oleaje

La Figura 8 muestra los campos de altura del oleaje (H_{rms}^{SW}), la altura de ondas infragravitatorias (H_{rms}^{LW}), y los perfiles de altura y profundidad para una sección transversal pasando sobre el campo de algas ($y = 150$) y fuera de él ($y = 5$) obtenidos mediante XBeach. Estas figuras corresponden a dos escenarios con alturas significativas de ola $H_{rms}^{SW} =$ de 1 y 5 m en la condición de borde ($x = 0$ m), respectivamente. Por otro lado, la Figura 9 presenta la eficiencia hidráulica del sistema PCA en función de la altura y el período del oleaje, la profundidad de la vegetación, el coeficiente de arrastre y la densidad de vegetación, considerando densidades de 5 y 10 unidades por metro cuadrado.

Figura 8. Campos de altura de oleaje para una densidad de 10 u/m^2 y $C_d = 0,5$.

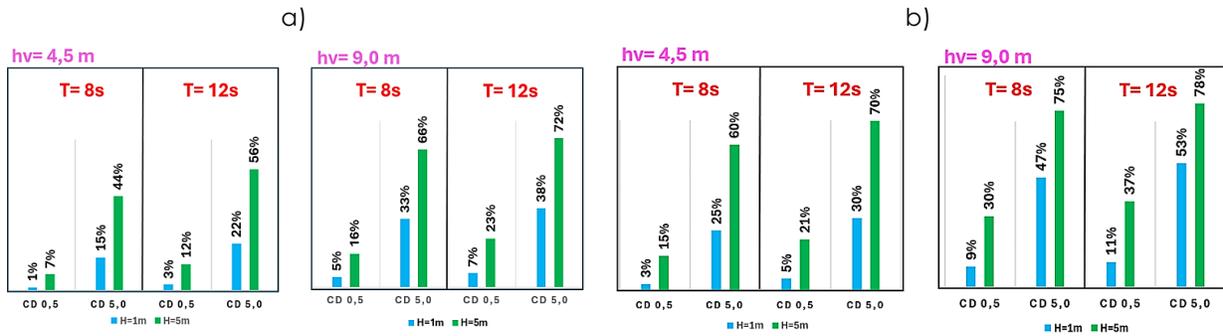


La eficiencia hidráulica del PCA depende tanto de los parámetros estructurales del sistema como de las características del oleaje incidente. Un mayor coeficiente de arrastre se traduce en una mayor disipación de energía, debido al incremento de la fuerza de arrastre sobre la estructura, lo que mejora la eficiencia del sistema. Por otra parte, un incremento en la altura conlleva una mayor disipación del oleaje en el PCA. En la Figura 8 se observa que, para un H_{rms}^{SW} de 1 m, la eficiencia del sistema es del 9%, mientras que, al aumentar la altura a 5 m, la eficiencia

incrementa al 30%. Esto indica que la eficiencia es dinámica y altamente influenciada por las características del oleaje incidente. Asimismo, al aumentar el período de la ola, la eficiencia hidráulica también se incrementa entre el 7% y el 12%. Este comportamiento sugiere que el período de ola es un factor relevante, aunque su impacto es menor respecto a la altura de ola.

Desde un punto de vista estructural, la densidad de vegetación juega un papel crucial en la eficiencia hidráulica del PCA. Así, se observa que una densidad de 5 u/m² puede alcanzar una eficiencia de hasta el 53% con valores del coeficiente de arrastre de hasta 5. Sin embargo, al duplicar la densidad a 10 u/m², la eficiencia puede incrementarse hasta el 78%. Estos resultados indican que tanto las variaciones en el coeficiente de arrastre como en la altura de ola tienen un impacto significativo en la eficiencia del sistema. En el escenario donde el coeficiente de arrastre es igual a 0.5, la altura y densidad de la vegetación se destacan como parámetros relevantes para la eficiencia hidráulica del PCA, lo que subraya su importancia en la evaluación de la factibilidad técnica del sistema.

Figura 9. Eficiencia hidráulica del sistema PCA en términos de altura (H), período (T), profundidad de la vegetación h_v , C_d = y densidad de vegetación de 5 u/m² y 10 u/m².



6 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas con ANSYS Fluent y XBeach proporcionan una base robusta para evaluar la interacción entre la vegetación marina y el oleaje en las costas de Chile, utilizando *Macrocystis pyrifera*. Se demuestra que tanto el diámetro y densidad de la vegetación, como el coeficiente de arrastre juegan un papel crucial en la disipación del oleaje, con una eficiencia hidráulica que puede alcanzar hasta un 78% bajo condiciones óptimas. Estos hallazgos son consistentes con la literatura existente para otras especies de vegetación y sugieren que el PCA tiene un gran potencial para ser implementado como una solución sostenible para la protección costera. Sin embargo, es necesario complementar estos resultados con estudios físicos e in situ para validar su precisión y garantizar su aplicabilidad a gran escala.

7 REFERENCIAS

1. Anderson M.E., Smith J.M. 2014. Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation *Coast. Eng.*, 83, pp. 82-92, 10.1016/j.coastaleng.2013.10.004.
2. Beya J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. 2016. Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso
3. Buschmann AH, Vásquez JA, Osorio P, Reyes E, Filún L, Hernández-González MC, Vega A (2004) The effect of water movement, temperature and salinity on abundance and reproductive patterns of *Macrocystis* spp. (Phaeophyta) at different latitudes in Chile. *Mar Biol* 145:849–862
4. Elsmore, K., Nickols, K. J., Miller, L. P., Ford, T., Denny, M. W., & Gaylord, B. (2024). Wave damping by giant kelp, *Macrocystis pyrifera*. *Annals of Botany*, mcad094, 133, 29–40. - PMC – PubMed
5. *Environment*, 46(2), 250-271.
6. Farías L., Ubilla K., Aguirre C., y otros 2019. Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional de Chile. Informe de la mesa Océanos. Santiago: Comité Científico COP 25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
7. Fonseca MS, Cahalan JA. 1992. A preliminary evaluation of wave attenuation by four species of seagrasses. *Estuar Coast Shelf Sci* 35:565-576.
8. Garzon J.L., Maza M., Ferreira C.M., Lara J.L., Losada I.J. 2019. Wave attenuation by *Spartina* saltmarshes in the Chesapeake Bay under storm surge conditions. *J. Geophys. Res. Oceans*, 124, pp. 5220-5243, 10.1029/2018JC014865
9. IFOP (2016). Informe de seguimiento número 15 de Maitencillo. Instituto de Fomento Pesquero.
10. Kobayashi, N., Raichle, A. W., and Asano, T. 1993. "Wave attenuation by vegetation." *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 119(1), 30–48.
11. León, J., Winckler, P., Vicuña, M., Guzmán, S., & Larraguibel, C. (2023). Assessing the Role of Land-Use Planning in Near Future Climate-Driven Scenarios in Chilean Coastal Cities. *Sustainability*, 15(4), 3718.

12. Lopez, F., and M. Garcia. 1998. Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling, *Water Resour. Res.* 34, 9, 2341-2352.
13. Martínez, C., Grez, P. W., Martín, R. A., Acuña, C. E., Torres, I., & Contreras-López, M. (2022). Coastal erosion in sandy beaches along a tectonically active coast: The Chile study case. *Progress in Physical Geography*
14. Maza M., Lara J.L., Losada I.J., Ondiviela B., Trinogga J., Bouma T.J. 2015. Largescale 3-D experiments of wave and current interaction with real vegetation. Part 2: experimental analysis *Coast. Eng.*, 106, pp. 73-86.
15. Mendez, F. & Losada, I.J. 2004. An empirical model to estimate the propagation of random breaking and nonbreaking waves over vegetation fields. *Coastal Engineering*. 51. 103- 118. 10.1016/j.coastaleng.2003.11.003.
16. Mora-Soto, A., Palacios, M., Macaya, E., Gómez, I., Huovinen, P., Pérez-Matus, A., Young, M., Golding, N., Toro, M., Yaqub, M., y Macias-Fauria, M. (2020). Un mapa global de alta resolución de bosques de algas gigantes (*Macrocystis pyrifera*) y algas verdes intermareales (*Ulvophyceae*) con imágenes de Sentinel-2 . *Teledetección* , 12 (4) , 694.
17. Mork, M., 1996. Wave attenuation due to bottom vegetation. In: Grue, J., Gjevik, B., Weber, J.E. (Eds.), *Waves and Nonlinear Processes in Hydrodynamics*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 371–382.
18. Nepf HM. 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research* 35(2): 479 –489.
19. Nepf, H., M. Ghisalberti, B. White, and E. Murphy. 2008. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies, *Water Resour. Res.* 43, W04422, DOI: 10.1029/2006WR005362.
20. Paul, M., Rupprecht, F., Møller, I., Bouma, T.J., Spencer, T., Kudella, M., Wolters, G., van Wesenbeeck, B.K., Jensen, K., Miranda-Lange, M., Schimmels, S., 2016. Plant stiffness and biomass as drivers for drag forces under extreme wave loading: a flume study on mimics. *Coast. Eng.* 117, 70–78. *research*, 45(4), 622-648.
21. Rosman, J. H., J. R. Koseff, S. G. Monismith, and J. Grover (2007), A field investigation into the effects of a kelp forest (*Macrocystis pyrifera*) on coastal hydrodynamics and transport, *J. Geophys. Res.*, 112, C02016.

22. Shi Z, Pethick JS, Pye K. 1995. Flow structure in and above the various height of a saltmarsh canopy: a laboratory flume study. *Journal of Coastal Research* 11(4): 1204 – 1209.
23. Tsujimoto, T. 2000. Fluvial processes in streams with vegetation, *J. Hydraul. Res.* 37, 789-804.
24. van Veelen, TJ, Fairchild, TP, Reeve, DE y Karunarathna, H., 2020. Estudio experimental sobre la flexibilidad de la vegetación como parámetro de control para la amortiguación de las olas y la estructura de la velocidad, *Coastal Engineering* , 157, 103648.
25. Wamsley, T. V., Cialone M. A., Smith J. M., Atkinson J. H., and Rosati J. D. 2010. The potential of wetlands in reducing storm surge, *OceanEng.*, 37, 59–68, doi: 10.1016/j.oceaneng.2009.07.018
26. Ward L.G., Kemp W.M., Boynton W.R. 1984. The influence of waves and seagrass communities on suspended particles in an estuarine embayment. *Mar Geol* 59 85-103
27. Winckler, P., Aguirre, C., Farías, L., Contreras-López, M., & Masotti, Í. (2020). Evidence of climate-driven changes on atmospheric, hydrological, and oceanographic variables along the Chilean coastal zone. *Climatic Change*, 163(2), 633-652.
28. Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. F., & Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin american journal of aquatic*
29. Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., & Sactic, M. I. (2022). Impacts in ports on a tectonically active coast for climate-driven projections under the RCP 8.5 scenario: 7 Chilean ports under scrutiny. *Coastal Engineering Journal*, 64(3), 387-405.