

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Maestría en Ciencias en Oceanografía Física

Estudio numérico del efecto en el espectro direccional del oleaje ocasionado por la presencia de dispositivos CEO

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestra en Ciencias

Presenta:

Melissa Gabriela Jaramillo Torres

Ensenada, Baja California, México
2019

Tesis defendida por:
Melissa Gabriela Jaramillo Torres

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director de tesis

Dr. José Pedro Osuna Cañedo

Dr. Loic Marie Jean Claude Jose Ghislain Peiffer

Dr. Héctor García Nava



Dr. José Gómez Valdés
Coordinador del Posgrado en Oceanografía Física

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Melissa Gabriela Jaramillo Torres © 2019

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y del director de tesis

Resumen de la tesis que presenta Melissa Gabriela Jaramillo Torres como requisito parcial para la obtención del grado de Maestra en Ciencias en Oceanografía Física.

Estudio numérico del efecto en el espectro direccional del oleaje ocasionado por la presencia de dispositivos CEO

Resumen aprobado por:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Director de tesis

La energía de las olas puede ser extraída para su aprovechamiento mediante el uso de dispositivos conocidos como convertidores de energía del oleaje (CEO). La operación de estos dispositivos en el océano puede generar cambios considerables en las condiciones del estado de mar, particularmente en el espectro direccional del oleaje, los cuales a su vez pueden influir en la hidrodinámica y morfodinámica de la costa. En este trabajo se presentan resultados de simulaciones numéricas del efecto de la presencia de dispositivos CEO en el espectro direccional del oleaje. Las simulaciones numéricas se realizaron utilizando el modelo espectral de olas de tercera generación SWAN, al aplicarlo en la región de estudio que incluye a la Bahía Todos Santos, en Ensenada, Baja California, México. Se utilizó un dominio de malla estructurada con una resolución espacial de 250 m y una resolución temporal horaria. El modelo fue validado comparando los resultados con observaciones del oleaje realizadas con perfiladores acústicos tipo Doppler, ubicados en tres sitios durante un periodo de dos años. Los CEO fueron representados en el modelo numérico SWAN como obstáculos absorbedores de energía del oleaje, para lo cual se utilizó una función de rendimiento que depende de la frecuencia, conocida como RCW (*Relative Capture Width*), correspondiente a un dispositivo CEO *Flap-Type*. Se realizaron cuatro experimentos con diferentes arreglos de dispositivos CEO (1, 5, 10 y 25). Al comparar el experimento con 25 dispositivos con el caso sin dispositivos CEO, los resultados muestran una reducción de la altura significativa de hasta 30% a una distancia equivalente a una longitud de onda a sotavento del arreglo de dispositivos CEO. Los cambios en el período asociado al pico espectral y en la dirección de propagación promedio fueron menores que 2% en todos los experimentos. Adicionalmente, se evaluó el efecto de los dispositivos CEO en los términos fuente de disipación del oleaje por *white-capping* y por la fricción con el fondo. Los resultados sugieren que el momentum que se transfiere de las olas a las corrientes se reduce hasta un 59% por la presencia de los CEO. De la misma manera, las componentes de la fuerza inducida por el oleaje, resultado de los gradientes del tensor de radiación muestran cambios importantes, lo cual podría afectar a las corrientes a lo largo y hacia la costa y a su vez el transporte de sedimentos, inducidos por el oleaje.

Palabras clave: Convertidor de Energía del Oleaje, SWAN, simulaciones numéricas, ancho de captura relativa, espectro direccional del oleaje.

Abstract of the thesis presented by Melissa Gabriela Jaramillo Torres as a partial requirement to obtain the Master of Sciences degree in Physical Oceanography.

Numerical study of the effect of the presence of WEC devices on the directional wave spectrum

Abstract approved by:

Dr. Francisco Javier Ocampo Torres
Thesis Advisor

Wave energy can be extracted by means of devices known as Wave Energy Converters (WEC). The operation of these devices at the sea can generate important changes in the sea-state conditions, particularly in the directional wave spectrum, which in turn can influence the hydrodynamic and morphodynamic of the coast. This work presents results of numerical simulations of the effect of WEC devices on the directional wave spectrum. The numerical simulations were performed using the third generation spectral wave model SWAN, which was implemented in the study region that includes Todos Santos Bay, in Ensenada, Baja California, Mexico. A regular grid domain was used with a spatial resolution of 250 m and a hourly time resolution. The model was validated by comparing the results with observations of the wave field made with Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP), deployed at three sites over a period of two years. Each WEC was represented in the SWAN model as a wave energy absorber obstacle, for that, a frequency-dependent performance function was used, known as RCW (*Relative Capture Width*), which corresponds to a *Flap-Type* WEC device. Four experiments were performed with different WEC arrays (1, 5, 10 and 25). When comparing the 25 devices experiment with with the case without WEC devices, the results show a reduction in significant wave height of up to 30 % at a distance equivalent to a wavelength leeward of the array. Changes in the peak period and in the average wave direction were less than 2 % in all experiments. In addition, the effect of WEC devices on the source terms corresponding to wave dissipation by textit white-capping and by friction with the bottom, were evaluated. The results suggest that the momentum that is transferred from the waves to the currents is reduced up to 59 % by the presence of WECs. In the same way, the components of the wave-induced force, which is a function of the radiation stress tensor gradients, show important changes, which could affect the currents along and towards the coast and in turn the sediment transport, induced by the waves.

Palabras clave: Wave Energy Converter, numerical simulations, SWAN, Relative Capture Width, directional wave spectrum.

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría con número de beca 752669.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), especialmente al personal del Departamento de Oceanografía Física por la atención prestada y enseñanzas que me permitieron llevar a cabo esta etapa satisfactoriamente.

Al Centro Mexicano para la Innovación en Energía del Océano (CEMIE-Océano) por el apoyo económico brindado para poder finalizar el desarrollo de esta tesis.

Al comité de tesis por sus sugerencias y recomendaciones.

Al grupo de oleaje del CICESE y UABC, especialmente a Daniel, Lucía, Rene, Marco, Diego Galván, Emiliano y Héctor García por sus asesorías y recomendaciones para la realización del trabajo de tesis.

A mis compañeros de posgrado: Brenda, Laura, Karina, Jessica, Mireya, Juan, Diego, Homar, Jonathan, Fernando, Jean Carlo, Puma y Lalo por los tiempos y conocimientos compartidos.

Al equipo de SNL-SWAN por sus sugerencias en el uso del modelo numérico.

A mi papa, a Daniel y Tania por su cariño y apoyo incondicional.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	x
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	4
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
Capítulo 2. Metodología	6
2.1 Modelo numérico SWAN	7
2.2 Dominio de aplicación del modelo numérico SWAN	10
2.2.1 Observaciones con perfiladores acústicos tipo Doppler	11
2.2.2 Validación del modelo numérico SWAN	15
2.3 Representación de los dispositivos CEO en el modelo SWAN	24
2.4 Descripción de los experimentos numéricos	27
2.4.1 Diseño de arreglos con dispositivos CEO para simulaciones numéricas	31
Capítulo 3. Resultados y discusiones	33
3.1 Efectos en la altura significativa	33
3.2 Efectos en el periodo asociado al pico espectral	37
3.3 Efectos en la dirección de propagación	39
3.4 Efectos en los gradientes de los esfuerzos de radiación	40
3.5 Efectos en el término fuente de la disipación de energía	45
3.6 Efecto en la potencia del oleaje	55
Capítulo 4. Conclusiones	65
Literatura citada	67

Lista de figuras

Figura	Página
1 Descripción gráfica de la columna de agua que se usa para desarrollar las expresiones de la energía de las olas. Tomado de Holthuijsen (2010)	2
2 Diagrama de la metodología utilizada en el presente trabajo.	6
3 Dominio utilizado para la validación del modelo numérico SWAN, que incluye a la Bahía de Todos Santos, Ensenada, BC, México. Dentro de este dominio se muestran marcados como ITS, PH y PM los sitios con sensores tipo ADCP.	11
4 Señales de P , U y V obtenidas de la adquisición de datos del ADCP de ITS correspondientes a la fecha de 08/enero/2015 a las 00:00 horas.	13
5 Ejemplo de los resultados de la densidad espectral de la energía en función de (a) la frecuencia y (b) la dirección. Ambas pertenecen al procesamiento de las señales del burst correspondiente a las 00 : 00 horas del 8 de enero de 2015 de las mediciones realizadas en la estación de ITS.	14
6 Ejemplos de dos espectros direccionales utilizados en las condiciones de frontera, obtenidos de de la base de datos de IOWAGA.	16
7 Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación ITS, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.	18
8 Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación PH, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.	19
9 Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación PM, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.	20

10	Serie temporal de los resultados obtenidos con el modelos numérico y a partir de las observaciones del parámetro integral H_s en la estación de ITS en el mes de agosto de 2015.	23
11	Comparación de las a) observaciones y b) resultados del modelo numérico SWAN correspondiente a la evolución temporal del espectro de energía en función de la frecuencia para la estación de ITS en agosto de 2015.	24
12	Valores de RCW en función de la frecuencia correspondientes al principio de funcionamiento del dispositivo CEO <i>Flap-Type</i> , basado en información obtenida de Renzi <i>et al.</i> (2014).	27
13	Mapa de H_s correspondiente a un tiempo, específicamente el 1 de enero de 2015 a las 12 AM. Además, se muestra la ubicación de la malla anidada que se representa mediante la línea continua de color rojo y, en línea discontinua se indica el área en donde fueron ubicados los CEO <i>Flap-Type</i> .	28
14	Resultados de la función de distribución de probabilidad conjunta, donde N es la cantidad de ocurrencias de las combinaciones de H_s y T_p en la temporada de invierno del año 2015.	29
15	Resultados de la función de distribución de probabilidad conjunta, donde N es la cantidad de ocurrencias de las combinaciones de H_s y T_p en la temporada de verano del año 2015.	30
16	Resultados de ΔH_s , correspondiente a los Experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d) en el caso de invierno.	34
17	Resultados de ΔH_s , correspondiente a los Experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d) en el caso de verano.	35
18	Resultados de ΔH_s a distancias de $\lambda = 128$ m, $4\lambda = 512$ m, $8\lambda = 1024$ m y $12\lambda = 1536$ m de la simulación numérica del caso de invierno, correspondientes a los experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d).	36
19	Resultados de ΔH_s a distancias de $\lambda = 50$ m, $4\lambda = 200$ m, $8\lambda = 400$ m y $12\lambda = 600$ m de la simulación numérica del caso de verano, correspondientes a los experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d).	37
20	Resultados de ΔT_p correspondientes a la simulación numérica del caso de verano, del experimento a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4.	38
21	Resultados de ΔT_p correspondientes a la simulación numérica del caso de invierno, del experimento a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4.	39

22	Resultados de $\Delta Dir(\%)$ correspondientes al periodo de simulación numérica de verano. Donde los incisos <i>a</i>), <i>b</i>), <i>c</i>) y <i>d</i>) corresponden a los experimentos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.	40
23	Resultados de F_x correspondientes a las simulaciones numéricas del periodo de invierno en los experimentos 1 <i>a</i>) y 4 <i>b</i>), a diferentes distancias de $\lambda = 128\text{m}$, $2\lambda = 256\text{m}$, $3\lambda = 384\text{m}$, y $4\lambda = 512\text{m}$	43
24	Resultados de F_y correspondientes a las simulaciones numéricas del periodo de invierno en los experimentos 1 <i>a</i>) y 4 <i>b</i>), a diferentes distancias de $\lambda = 128\text{ m}$, $2\lambda = 256\text{ m}$, $3\lambda = 384\text{ m}$ y $4\lambda = 512\text{ m}$	44
25	Área de cobertura de la malla computacional utilizada en la simulación numérica. Los colores representan la altura significativa del oleaje correspondiente al 1 de enero de 2015 a las 12 AM. La línea punteada representa el área donde se localizan los dispositivos CEO. El punto de análisis ubicado en -116.64°W , 31.8185°N para la comparación de los resultados de los términos fuente correspondientes a los experimentos 1 y 4 y el Experimento de referencia se representa con el punto negro.	45
26	Resultados de espectros en función de la frecuencia obtenidos a partir de la simulación numérica en el caso del periodo invierno, a una distancia de $\lambda = 128\text{ m}$ a sotavento de los CEO correspondientes al experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al experimento 1 y al experimento 4.	46
27	Resultados de espectros en función de la frecuencia obtenidos a partir de la simulación numérica en el caso del periodo verano, a una distancia de $\lambda = 50\text{m}$ a sotavento de los CEO correspondientes al experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al experimento 1 y al experimento 4.	47
28	Resultados de los espectros de la densidad de energía en función de la frecuencia correspondientes al caso de invierno. Estos pertenecen al Experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al Experimento 1 y al Experimento 4 a distancias de a) $2\lambda = 256\text{m}$, b) $4\lambda = 512\text{m}$, y c) $8\lambda = 1024\text{m}$, respectivamente.	48
29	Resultados de los espectros de la densidad de energía en función de la frecuencia correspondientes al caso de verano. Estos pertenecen al Experimento de referencia (sin dispositivos CEO), el Experimento 1 y el Experimento 4 a distancias de a) $2\lambda = 100\text{m}$, b) $4\lambda = 200\text{m}$, y c) $8\lambda = 400\text{m}$	49

30	Resultados de la simulación numérica del caso de invierno correspondientes a $S_{ds,fr}$, para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4 en el punto de análisis.	50
31	Resultados de la simulación numérica del caso de verano correspondientes a $S_{ds,fr}$, para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4 en el punto de análisis.	51
32	Resultados de $S_{ds,wc}$ en el punto de análisis obtenidos del caso de invierno correspondientes a los Experimentos 1 y 4 y para el Experimento de referencia.	53
33	Resultados de $S_{ds,wc}$ en el punto de análisis obtenidos del caso de verano correspondientes a los Experimentos 1 y 4 y para el Experimento de referencia.	54
34	Resultados de la potencia $P[kW/m]$, obtenida a partir de la ecuación (45) en el punto de análisis, correspondiente a las simulaciones numéricas del año 2015.	56
35	(a) Función $D(\theta) = \cos(\theta - \theta_0)^{2m}$ con $m = 10$, que indica la fracción del total de $RCW(f)$ de absorción de energía de los dispositivos CEO como función de la dirección. (b) Representación gráfica de $RCW(f, \theta)$ en función de la frecuencia y dirección para el CEO.	58
36	(a) Función $D(\theta) = \cos(\theta - \theta_0)^{2m}$ con $m = 2$, que indica la fracción del total de $RCW(f)$ de absorción de energía de los dispositivos CEO como función de la dirección. (b) Representación gráfica de $RCW(f, \theta)$ en función de la frecuencia y dirección para el CEO.	59
37	Resultados correspondientes al caso de invierno en el nodo de análisis. (a) Espectro direccional del oleaje incidente. (b) Potencia del oleaje incidente. (c) Potencia absorbida por el CEO <i>Flap-Type</i> estimada de la ecuación $P_{abs.1}$ (d) Potencia absorbida de acuerdo con la ecuación $P_{abs.2}$	61
38	Resultados correspondientes al caso de verano en el nodo de análisis. (a) Espectro direccional del oleaje incidente. (b) Potencia del oleaje incidente. (c) Potencia absorbida por el CEO <i>Flap-Type</i> estimada de la ecuación $P_{abs.1}$ (d) Potencia absorbida de acuerdo con la ecuación $P_{abs.2}$	62

Lista de tablas

Tabla	Página
1 Información de las características correspondientes a los sensores ADCP utilizados en las estaciones ITS, PH y PM.	15
2 Valores estadísticos de RMSE, sesgo, SI y R de la comparación de los resultados numéricos y observaciones al estimar los parámetros integrales del oleaje, para las estaciones de ITS, PM y PH.	22
3 Características de los experimentos diseñados para las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO.	31
4 Valores de la diferencia de la energía en porcentaje, para el caso de invierno en tres distancias a sotavento de los dispositivos CEO, las cuales son: a) $2\lambda = 256\text{m}$, b) $4\lambda = 512\text{m}$, y c) $8\lambda = 1024\text{m}$	48
5 Valores de la diferencia de la energía en porcentaje, para el caso de verano en tres distancias a sotavento de los dispositivos CEO, las cuales son: a) $2\lambda = 100\text{m}$, b) $4\lambda = 200\text{m}$, y c) $8\lambda = 400\text{m}$	49
6 Resultados de la integral de $S_{ds,fr}(f)$ para los experimentos 1 y 4 y el experimento de referencia en los casos de invierno y verano. Donde $\Delta[\%]$ indica el porcentaje de la diferencia entre el experimento de referencia y los experimentos 1 y 4.	52
7 Resultados de las simulaciones numéricas de los periodos de invierno y verano correspondientes al flujo de momento por unidad de superficie, τ_c , para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4. Donde $\Delta\%$ indica el porcentaje de la diferencia entre el experimento de referencia y los experimentos 1 y 4.	55
8 Estimación de la potencia absorbida de acuerdo con las formulaciones de $P_{abs.1}$ y $P_{abs.2}$ al utilizar $m = 2$ y $m = 10$ para los casos de invierno y verano.	63
9 Potencia absorbida en kW·h y potencia absorbida por unidad de dispositivo CEO (P.abs.u.) estimados a partir de los cuatro experimentos diseñados (ver capítulo 2), correspondientes al periodo de las simulaciones de invierno y verano.	64

Capítulo 1. Introducción

La dinámica del océano está determinada por procesos físicos que ocurren en diferentes escalas de espacio y de tiempo, por ejemplo, los gradientes térmicos y salinos, las mareas y el oleaje. Estos procesos pueden considerarse como fuentes renovables de energía por tratarse de mecanismos naturales que ocurren de manera cíclica (Melikoglu, 2018).

El oleaje es un conjunto de ondas generadas por el esfuerzo del viento que actúa sobre la superficie del océano, las cuales se propagan sobre este mismo. La energía de las olas puede considerarse como una consecuencia de la energía solar, ya que por el efecto de la radiación emitida por el sol, se produce un calentamiento diferencial en la atmósfera, lo cual da lugar al movimiento de masas de aire (viento). Durante la interacción del viento con la superficie del océano, se transfiere una parte de la energía para la generación del oleaje (Bhattacharyya y McCormick, 2003).

En general, las olas se pueden describir como una sumatoria de ondas sinusoidales con características como la amplitud (a), la longitud de onda (λ), el periodo (T), la rapidez de fase (c) y la dirección de propagación (θ). Las olas se caracterizan por el movimiento con órbita semi-cerrada que describen las partículas de agua (velocidades orbitales), que a su vez genera la oscilación de la superficie libre del mar (η). Esto implica que las partículas de agua se trasladan de su posición en reposo a otra posición, lo que requiere un trabajo realizado contra la fuerza de la gravedad, lo cual representa la energía potencial de las olas. A su vez, el movimiento oscilatorio de las partículas de agua representa la energía cinética de las olas. Este movimiento disminuye exponencialmente con la profundidad (Holthuijsen, 2010).

La energía potencial se puede estimar al considerar un volumen de agua con un espesor Δz y con un área horizontal correspondiente a Δx y Δy , que se encuentra en una columna de agua con profundidad $z = -d$ (Figura 1). La energía potencial instantánea (es decir, la elevación del volumen de agua, en un momento dado en el tiempo) del volumen de referencia relativo a $z = 0$, es entonces, el producto de $\rho g z \Delta x \Delta y \Delta z$, donde ρ es la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad.

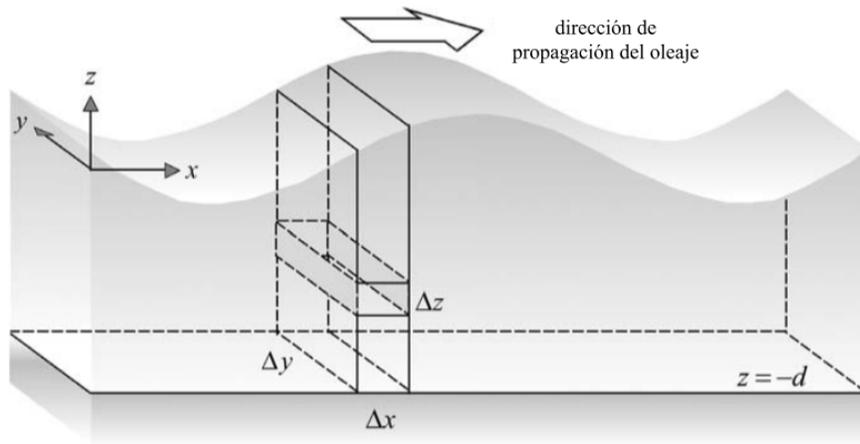


Figura 1. Descripción gráfica de la columna de agua que se usa para desarrollar las expresiones de la energía de las olas. Tomado de Holthuijsen (2010)

La energía potencial E_p inducida por el oleaje es igual a la energía potencial en presencia de olas menos la energía potencial en ausencia de éstas, por unidad de área superficial y promediada (barra horizontal) en el tiempo durante un período, y se expresa como,

$$E_p = \overline{\int_{-d}^{\eta} \rho g z dz} - \overline{\int_{-d}^0 \rho g z dz} = \overline{\int_0^{\eta} \rho g z dz}, \quad (1)$$

para una onda monocromática con amplitud a , el resultado de esta integral es

$$E_p = \frac{1}{4} \rho g a^2. \quad (2)$$

La energía cinética instantánea en el mismo volumen de referencia, es $E_c = \frac{1}{2} \rho u^2 \Delta x \Delta y \Delta z$, donde u corresponde a la velocidad de las partículas de agua, cuyo cuadrado es $u^2 = u_x^2 + u_y^2$. El promedio en el tiempo de la energía cinética E_c en la columna de agua por unidad de superficie, está dada por,

$$E_c = \overline{\int_{-d}^{\eta} \frac{1}{2} \rho u^2 dz}, \quad (3)$$

y el resultado de E_c para una onda monocromática con amplitud a , utilizando las expresiones de u_x y u_y de la teoría lineal del oleaje (Holthuijsen, 2010) es,

$$E_c = \frac{1}{4} \rho g a^2. \quad (4)$$

Con las aproximaciones de la teoría lineal del oleaje, la energía potencial es igual a la energía cinética ($E_p = E_c$), y la energía total de las olas promediada en el tiempo es,

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \rho g a^2. \quad (5)$$

La energía de las olas puede convertirse en otro tipo de energía mediante dispositivos conocidos como convertidores de energía del oleaje (en adelante CEO) (Bhattacharyya y McCormick, 2003). La instalación y operación de dispositivos CEO en el océano puede modificar la dinámica que genera el oleaje de manera natural (O'Dea *et al.*, 2018). Es necesario analizar la interacción entre el oleaje y dichos dispositivos, con la finalidad de conocer el efecto de la presencia de los CEO y realizar estudios para minimizar su impacto en el entorno y maximizar la extracción de energía del oleaje en los sitios de interés.

La solución más común para evaluar la estimación de la energía absorbida por los dispositivos CEO es considerar los parámetros integrales del oleaje, como una aproximación del espectro direccional del oleaje. Esta aproximación no es completamente precisa, particularmente en regiones donde el campo de oleaje se caracteriza por sistemas complejos y variables. Para tales casos, considerar el espectro direccional del oleaje es más conveniente para evaluar la energía absorbida por los dispositivos CEO (Saulnier *et al.*, 2011). En el presente trabajo se estudia el efecto de la presencia de los dispositivos CEO a partir del análisis de los espectros direccionales del oleaje resultantes de las simulaciones numéricas, con el objetivo de entender cómo los dispositivos CEO modifican la dinámica de las olas.

En la sección 1.1 de este capítulo se presentan los antecedentes al presente trabajo y posteriormente los objetivos planteados. En el capítulo 2 se presenta la metodología del trabajo, en la cual se muestran detalles del modelo numérico utilizado, así como, la implementación de los CEO y los experimentos realizados. Finalmente, en los capítulos 3 y 4, se discuten los resultados más relevantes y se presentan las conclusiones, respectivamente.

1.1. Antecedentes

La simulación numérica permite realizar estudios sobre el efecto de los CEO en el régimen del oleaje y dar una estimación de los impactos en la zona costera. Autores como Troch *et al.* (2011), O'Dea *et al.* (2018) y Atan *et al.* (2019), han realizado simulaciones numéricas del oleaje con arreglos de dispositivos CEO para determinar las características óptimas de los arreglos. El efecto de los CEO en el oleaje depende de la configuración del arreglo de dispositivos, que incluye la distancia de la costa, la separación entre cada uno y la interacción entre ellos mismos. Esto se ha analizado mediante la evaluación de los parámetros integrales del oleaje. Principalmente su efecto se muestra en la reducción de la altura de las olas y la modificación de la dirección de propagación del oleaje (Chang *et al.*, 2016; Sarkar *et al.*, 2014; Troch *et al.*, 2011; Veigas *et al.*, 2014).

Específicamente en el estudio realizado por O'Dea *et al.* (2018), el efecto de los CEO se analizó variando el espaciamiento entre los dispositivos y la distancia entre la costa y los CEO. A partir de sus resultados se propone un método para el análisis paramétrico del transporte de sedimentos producido por la generación de corrientes a lo largo y hacia la costa, debido a la presencia de los dispositivos CEO. Al disminuir el espaciamiento entre los dispositivos CEO (en un arreglo dado) y al aumentar la cercanía de la costa, el cambio en los parámetros integrales del oleaje es mayor. Estos gradientes espaciales generan un incremento en las fuerzas inducidas relacionadas con el tensor de esfuerzo de radiación que es uno de los factores principales en la generación de las corrientes litorales. De ahí la importancia de estudiar el impacto en la zona costera (transporte de sedimentos) debido a la presencia de dispositivos CEO en el campo de oleaje.

Por otra parte, autores como Falnes (2007), Drew *et al.* (2009) y Falcão (2010) han realizado estudios sobre la tecnología, clasificación y aspectos técnicos que se involucran en los dispositivos CEO. Estos resultados son importantes para identificar a cada uno de ellos y entender el principio de funcionamiento de cada tipo de dispositivo. Es importante realizar estudios específicos para los distintos tipos de dispositivos CEO con la finalidad de analizar su efecto en el oleaje, ya que este podría ser distinto.

A mediados de la década de los setenta, con la finalidad de evaluar la eficiencia de los dispositivos CEO Budar y Falnes (1975) introdujeron una razón de rendimiento, definida como la relación entre la potencia absorbida por el dispositivo relativa a sus dimensiones y la potencia del oleaje incidente. Esta relación se

conoce como RCW (*Relative Capture Width*, por sus siglas en inglés) o ancho relativo de captura.

En el presente trabajo se utiliza la relación RCW correspondiente al dispositivo CEO conocido como *Flap-Type* para realizar simulaciones numéricas y analizar con diversos experimentos el efecto de los CEO en el espectro direccional del oleaje.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de los dispositivos convertidores de energía del oleaje (CEO) en el espectro direccional de las olas mediante simulación numérica.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Validar el modelo numérico SWAN al aplicarlo en la Bahía de Todos Santos, Ensenada, BC, México.
2. Diseñar arreglos de experimentos para simular numéricamente el efecto de la presencia de dispositivos CEO en el campo de olas.
3. Analizar el efecto de la disipación de energía del oleaje debido a la presencia de los dispositivos CEO.

Capítulo 2. Metodología

En la Figura 2 se muestra un resumen de la metodología utilizada en el presente trabajo. La primera actividad fue la aplicación del modelo numérico SWAN en la región de estudio que incluye principalmente la Bahía de Todos Santos, BC, México. La validación del modelo numérico se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados de la simulación numérica con las observaciones. Posteriormente, se diseñaron experimentos con arreglos de dispositivos CEO para analizar diferentes casos del efecto de estos en el espectro direccional del oleaje. Se identificaron las combinaciones de altura significativa y el período asociado al pico espectral que ocurrieron con mayor frecuencia en las temporadas de invierno y verano durante el año 2015, obtenidas a partir de la distribución de probabilidad conjunta que se obtuvo con los resultados de la simulación numérica. Posteriormente se realizaron las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO para el caso más representativo de invierno y verano del año 2015 y, con los resultados obtenidos se analizó el efecto en los parámetros integrales del oleaje y en los términos fuente de la disipación de energía. En las siguientes secciones de este capítulo se dan los detalles de la metodología usada en el desarrollo de esta tesis.

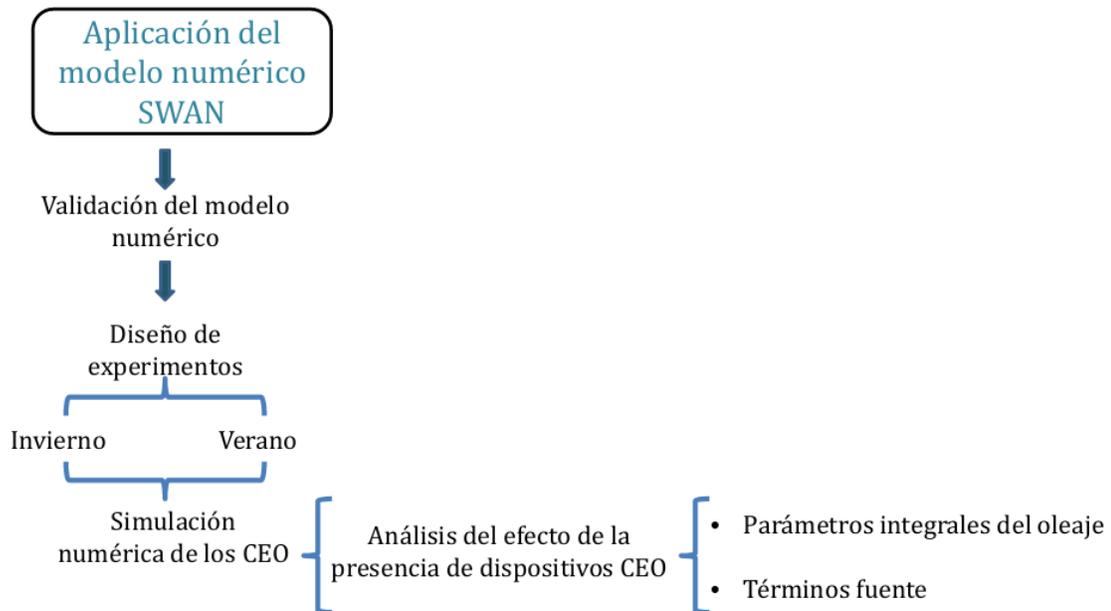


Figura 2. Diagrama de la metodología utilizada en el presente trabajo.

2.1. Modelo numérico SWAN

Las simulaciones numéricas del efecto de los dispositivos CEO en el campo de olas, se realizaron con el modelo numérico espectral de oleaje de tercera generación SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) versión 41.20. El modelo SWAN describe la evolución de las olas en el océano mediante el espectro direccional del oleaje $E(\omega, \theta)$. El espectro es una representación estadística de la densidad de energía de las olas en función de su frecuencia angular $\omega = 2\pi f$, y su dirección de propagación θ . El modelo numérico SWAN resuelve la ecuación de balance de acción (6) en coordenadas cartesianas para describir la evolución espacial y temporal de las olas, que incluye la generación, propagación y disipación del oleaje desde aguas profundas hasta zonas costeras (Booij *et al.*, 1999),

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\omega N}{\partial \omega} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = S_{\text{tot}}, \quad (6)$$

donde $N(\omega, \theta) = E(\omega, \theta)/\omega$ es la densidad de acción, c_x y c_y son las componentes de la velocidad de propagación en el espacio geográfico, y c_ω y c_θ son las componentes de la velocidad en el espacio de las frecuencia y de las direcciones, respectivamente.

El término S_{tot} representa la sumatoria de los términos fuente de los procesos físicos asociados al crecimiento de las olas por la transferencia de energía del viento (S_{in}), la redistribución de la energía por interacciones no lineales (S_{nl}), y la disipación de la energía (S_{ds}), de forma que,

$$S_{\text{tot}} = S_{\text{in}} + S_{\text{nl}} + S_{\text{ds}}. \quad (7)$$

El término fuente asociado con el crecimiento de las olas se identifica como, $S_{\text{in}}(\omega, \theta) = A + BE(\omega, \theta)$, donde A y B son coeficientes que describen el crecimiento lineal y exponencial del oleaje respectivamente, donde éstos dependen de la rapidez y dirección del viento. El coeficiente B toma en cuenta explícitamente los efectos de la capa límite atmosférica marina y la rugosidad de la superficie del mar. Este coeficiente está dado por:

$$B = \beta \omega \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{c} \right)^2 \cos^2(\theta - \theta_w), \quad (8)$$

donde β es la constante de Miles que depende de la rugosidad de la superficie del mar, U_* es la velocidad de fricción del viento calculada con el procedimiento iterativo de Mastenbroek *et al.* (1993), θ_w es la dirección del viento correspondiente a una altura de 10 metros sobre el nivel medio del mar y θ es la dirección de propagación de las olas. El término c es la rapidez de fase, ρ_a es la densidad del aire y ρ_w es la densidad del agua. Por otro lado, A representa el crecimiento lineal de las olas por el mecanismo de resonancia propuesto por Phillips (1957), en donde se usa la expresión propuesta en Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981).

El término de disipación S_{ds} representa la sumatoria de tres procesos: la disipación por *white-capping*, $S_{ds,wc}$; por fricción con el fondo, $S_{ds,fr}$ y por el rompimiento inducido por la profundidad, $S_{ds,b}$.

La disipación de energía por *white-capping*, $S_{ds,wc}$, indica la razón de cambio de la energía del oleaje asociada al rompimiento de las olas en aguas profundas y corresponde con la transferencia de energía al campo de las corrientes. Este proceso está parametrizado por la ecuación (9), que se basa en el modelo de Hasselmann (1974), modificado por The WAMDI Group (1988), y está dado por,

$$S_{ds,wc}(\omega, \theta) = -\Gamma \bar{\omega} \frac{k}{k} E(\omega, \theta), \quad (9)$$

donde Γ es un coeficiente que depende de la pendiente promedio del oleaje, k es el número de onda y la barra indica el promedio aritmético.

El término de disipación de energía por fricción con el fondo, $S_{ds,fr}$, depende de la interacción del oleaje con el fondo marino y es debido a la fricción, la percolación y las irregularidades del fondo. Está dado por:

$$S_{ds,fr}(\omega, \theta) = -C_b \frac{\omega^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\omega, \theta), \quad (10)$$

que se obtiene a partir de los modelos de Hasselmann *et al.* (1973), Collins (1972) y Madsen *et al.* (1988), donde C_b es un coeficiente de fricción en el fondo, g es la aceleración debida a la gravedad, d

es la profundidad y k es el número de onda.

Cuando las olas se propagan hacia la costa, la reducción de la profundidad induce un proceso conocido como asomeramiento, que ocasiona un aumento en la altura de las olas. Cuando la relación entre la altura de la ola y la profundidad del agua llega a un cierto límite, las olas rompen. En estos casos el proceso de rompimiento del oleaje es inducido por la profundidad y la expresión para describir el término $S_{ds,b}$ está dada por,

$$S_{ds,b}(\omega, \theta) = \frac{D_{Tot}}{S_{Tot}} E(\omega, \theta), \quad (11)$$

donde S_{Tot} es la energía total, y $D_{Tot} < 0$ es la razón de disipación de la energía total del oleaje debido al rompimiento de acuerdo a los resultados presentados por Battjes y Janssen (1978).

El término de las interacciones no lineales entre las olas (S_{nl}) representa la redistribución de la energía en el espacio espectral. Principalmente, la transferencia de energía ocurre desde las frecuencias altas hacia las frecuencias bajas. En el caso de aguas someras las interacciones no lineales ocurren en paquetes de tres olas S_{nl3} (triadas) y en el caso de aguas profundas ocurren en paquetes de cuatro olas S_{nl4} (cuadrupletas).

La tasa de cambio de la densidad de acción N_1 , de la componente con el número de onda \vec{k}_1 debido a las interacciones no lineales entre las cuadrupletas que involucran a \vec{k}_1 , se determina por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial t} = G \int \int \int (\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \times \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \\ \times \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4) \\ \times [N_1 N_3 (N_4 - N_2) + N_1 N_4 (N_3 - N_1)] (d\vec{k}_2 d\vec{k}_3 d\vec{k}_4), \end{aligned} \quad (12)$$

donde $N(\vec{k}) = E(\vec{k})/\omega$ es la densidad de acción expresada en términos del vector número de onda \vec{k} . El término G es un coeficiente de acoplamiento que depende de las componentes de los números de onda y se expresa como:

$$G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) = \frac{9\pi g^2 D^2(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4)}{4\rho^2 \omega_1 \omega_2 \omega_3 \omega_4}. \quad (13)$$

En el modelo SWAN se puede calcular el término de las interacciones no lineales debido a las cuadrupletas de dos formas. La primera consiste en el método exacto, donde la solución es muy compleja y consume demasiado tiempo de cómputo. La segunda, es una aproximación propuesta por Hasselmann y Hasselmann (1985) conocida como DIA (*Discrete Interaction Approximation*). El DIA consiste en una simplificación de la integral de Boltzman donde solo se consideran dos combinaciones de cuadrupletas de la gama infinita de combinaciones posibles y se argumenta que es suficiente para representar la redistribución de la energía en la mayoría de los casos.

Para resolver la ecuación de balance de acción en el modelo numérico SWAN, se utiliza un esquema de propagación implícito basado en diferencias finitas, en el cual los cálculos se realizan de forma iterativa hacia atrás, tanto en el espacio como en el tiempo, mediante el esquema denominado como BSBT (*Backward Space, Backward Time*).

2.2. Dominio de aplicación del modelo numérico SWAN

Las simulaciones numéricas con el modelo SWAN fueron realizadas en el dominio presentado en la Figura 3. En el mapa se incluye la Bahía de Todos Santos (BTS), localizada en Ensenada, Baja California, México. En la BTS se han instalado tres perfiladores acústicos tipo Doppler (ADCP, por sus siglas en inglés) en los sitios definidos como estaciones: PH (Playa Hermosa), ITS (Isla de Todos Santos) y PM (Punta Morro). Para la validación del modelo numérico SWAN se utilizaron datos adquiridos de las mediciones con los ADCP desde el año 2015 hasta el año 2016.

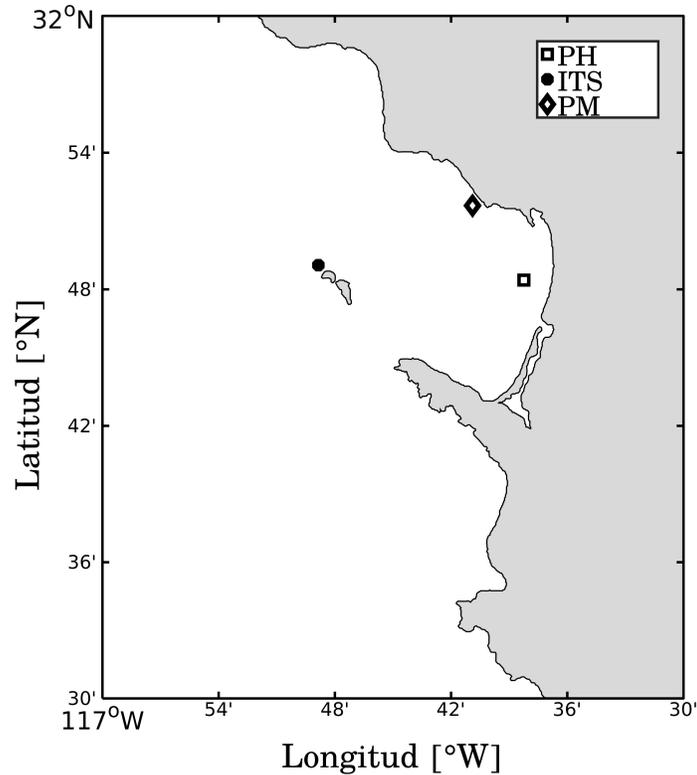


Figura 3. Dominio utilizado para la validación del modelo numérico SWAN, que incluye a la Bahía de Todos Santos, Ensenada, BC, México. Dentro de este dominio se muestran marcados como ITS, PH y PM los sitios con sensores tipo ADCP.

2.2.1. Observaciones con perfiladores acústicos tipo Doppler

Los ADCP son sensores que se pueden anclar al fondo marino y tienen la capacidad de medir el perfil de las corrientes y el oleaje a partir del efecto Doppler. El principio de funcionamiento de los ADCP consiste en emitir señales de sonido con una frecuencia conocida y detectar el cambio de la frecuencia de la señal hacia el instrumento reflejada por partículas en suspensión (Díaz, 2015; Gordon y Lohrmann, 2002).

Las señales que se adquieren con los sensores ADCP son la presión (P) que registra información de la elevación de la superficie libre del mar (η) y las componentes horizontales (U , V) de la velocidad de la corriente. Los datos colectados durante el muestreo se almacenan en paquetes de información, a los que se les denomina *burst*. Los ADCP utilizados fueron programados para medir cada hora, un *burst* de 1024 datos, a una tasa de muestreo de 1 Hz.

A partir de las series de tiempo de P , U y V se estima el espectro direccional del oleaje con el método

PUV (Gordon y Lohrmann, 2002). Este método consiste en calcular el espectro de la señal de presión $S_{pp}(f)$ y el espectro cruzado entre la presión y las componentes de la velocidad, $S_{pu}(f)$ y $S_{pv}(f)$. De la teoría lineal del oleaje, $S_{pp}(f)$ se puede estimar el espectro de la elevación de la superficie libre, como,

$$S_{\eta\eta}(f) = \left[\frac{\cosh kh}{\cosh k(h+z)} \right]^2 \frac{S_{pp}(f)}{\rho^2 g^2}, \quad (14)$$

donde h es la profundidad de la columna de agua y z es la profundidad de medición de la presión. La dirección de propagación del oleaje se obtiene mediante,

$$\delta(f) = \tan^{-1} \left[\frac{S_{pv}}{S_{pu}} \right], \quad (15)$$

como una función de la frecuencia f , de cada una de las componentes del oleaje.

En la Figura 4 se muestran las señales adquiridas de los campos P , U y V que corresponden a un burst. En la Figura 5 se observan los resultados obtenidos del procesamiento de las señales mediante el método PUV, en la cual se muestra la densidad espectral de la energía en función de (a) la frecuencia y (b) la dirección. En el caso de la figura del espectro direccional, inciso (Figura 5b), la dirección predominante es hacia el este (90°) con respecto al norte, y los círculos corresponden a la frecuencia en Hz. Como ejemplo, las figuras 4 y 5 corresponden a las mediciones realizadas por el ADCP localizado en la estación de Isla de Todos Santos (ITS) el 8 de enero de 2015 a las 12 AM.

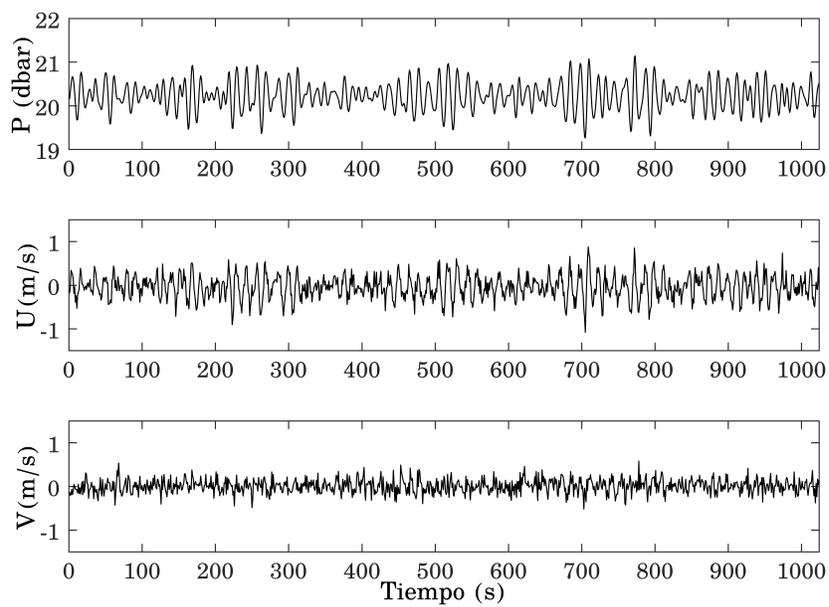
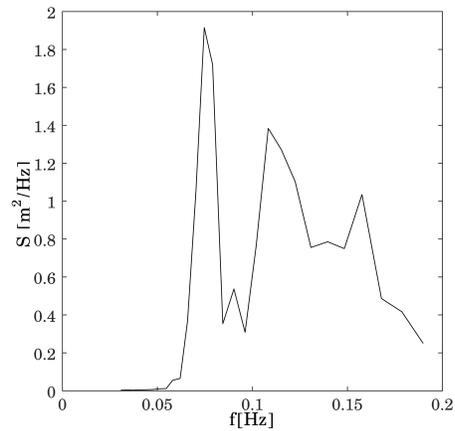
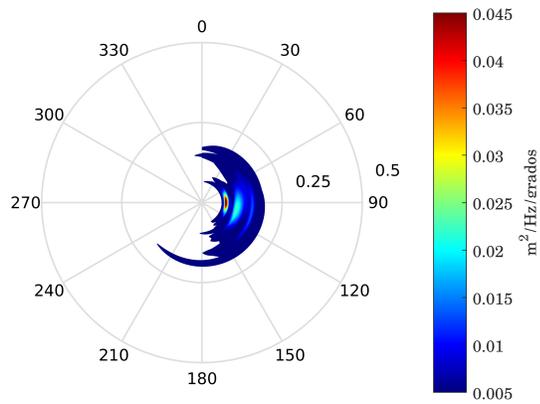


Figura 4. Señales de P , U y V obtenidas de la adquisición de datos del ADCP de ITS correspondientes a la fecha de 08/enero/2015 a las 00:00 horas.



(a)



(b)

Figura 5. Ejemplo de los resultados de la densidad espectral de la energía en función de (a) la frecuencia y (b) la dirección. Ambas pertenecen al procesamiento de las señales del burst correspondiente a las 00 : 00 horas del 8 de enero de 2015 de las mediciones realizadas en la estación de ITS.

La información de las características correspondientes a los sensores ADCP que se utilizaron en los sitios señalados en la Figura 3 como ITS, PH y PM se muestran en la Tabla 1, en la que se incluye también la ubicación de cada estación, la profundidad en la que están instalados los sensores y la frecuencia de muestreo de cada uno.

Tabla 1. Información de las características correspondientes a los sensores ADCP utilizados en las estaciones ITS, PH y PM.

Estación	Modelo	Latitud	Longitud	Profundidad	Frecuencia de muestreo
ITS	AWAC	31.8177°N	116.8142° W	~20 m	1 Hz
PM	AWAC	31.8613°N	116.6815° W	~20 m	1 Hz
PH	Aquadopp	31.8068°N	116.6373° W	~10 m	1 Hz

2.2.2. Validación del modelo numérico SWAN

La validación del modelo SWAN consistió en comparar los resultados numéricos con las observaciones adquiridas con los ADCP en ITS, PH, y PM durante los años 2015 y 2016.

Se aplicó el modelo SWAN en una malla computacional de 200 por 200 puntos, y con una resolución espacial de 250 metros, con los límites del dominio utilizado, como se muestran en la Figura 3. El modelo fue forzado en modo no estacionario en la frontera oeste con espectros direccionales obtenidos a partir de la base de datos IOWAGA (*Integrated Ocean Wave for Geophysical and other Applications*). En la Figura 6 se muestran un par de los espectros direccionales utilizados en las condiciones de frontera. Los espectros resultantes de las simulaciones numéricas tienen una resolución direccional de 5 grados, una resolución temporal horaria y una distribución de 31 frecuencias, que cubren desde 0.04 Hz hasta 0.7 Hz, distribuidas logarítmicamente.

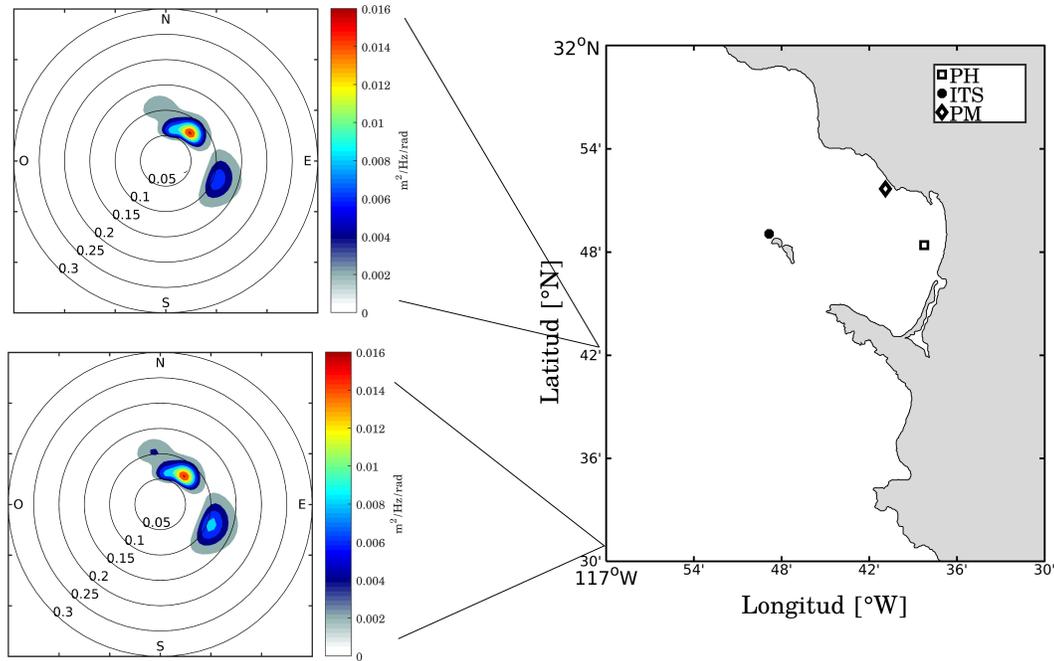


Figura 6. Ejemplos de dos espectros direccionales utilizados en las condiciones de frontera, obtenidos de de la base de datos de IOWAGA.

En el procedimiento de validación, se utilizaron seis parámetros integrales del oleaje, que se calculan a partir del espectro de la densidad de energía del oleaje en función de la frecuencia $S(f)$ y en función de la frecuencia y dirección $S(f, \theta)$. La altura significativa (H_s) representa el promedio de la altura de un tercio de las olas más altas y se estima de acuerdo con,

$$H_s = 4\sqrt{\int S(f)df}. \quad (16)$$

El periodo asociado al pico espectral (T_p) representa al periodo asociado al máximo valor de la densidad de energía y se calcula como,

$$T_p = \frac{\int S(f)^4 df}{\int f S(f)^4 df}. \quad (17)$$

El parámetro (T_{m01}) es el periodo promedio en un grupo de olas y se estima como,

$$T_{m01} = \left(\frac{\int f S(f) df}{\int S(f) df} \right)^{-1}. \quad (18)$$

La dirección de propagación promedio del oleaje (Dir) se calcula a partir del espectro direccional de las olas, de acuerdo a la siguiente fórmula,

$$Dir = \arctan \left(\frac{\int \int \sin(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int \int \cos(\theta) S(f, \theta) df d\theta} \right). \quad (19)$$

El parámetro F_{spr} es el ancho normalizado del espectro en frecuencia y en si, es un número adimensional de la distribución de la energía en función de la frecuencia Battjes y Van Vledder (1984), y se calcula de acuerdo a,

$$F_{spr} = \frac{\text{máx} [S(f) e^{i2\pi f T_{m02}} df]}{\int S(f) df}, \quad (20)$$

donde T_{m02} está dado por,

$$T_{m02} = \left(\frac{\int f^2 S(f) df}{\int S(f) df} \right)^{-1}. \quad (21)$$

Por otro lado, D_{spr} se refiere al ancho de la distribución direccional del oleaje, donde un D_{spr} pequeño indica que la dirección de propagación las olas está concentrada en un rango pequeño (Kuik *et al.*, 1988), y puede representarse como,

$$(D_{spr})^2 = 2 \left(1 - \sqrt{\left[\frac{\int \sin(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int S(f, \theta) df d\theta} \right]^2 + \left[\frac{\int \cos(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int S(f, \theta) df d\theta} \right]^2} \right). \quad (22)$$

Los resultados de las simulaciones numéricas y de las observaciones se comparan mediante diagramas de dispersión, como se muestra en las Figuras 7, 8 y 9).

A partir de los diagramas de dispersión se puede apreciar que la altura significativa es el parámetro integral mejor reproducido por el modelo, ya que la mayor cantidad de datos del conjunto total se concentra

alrededor de la línea de correspondencia de 1 a 1. Los resultados del parámetro integral T_p muestran mayor dispersión, a pesar de esto, la mayoría de los datos se encuentran cerca de la línea de correspondencia, a excepción de algunos casos particulares que representan menos del 5% de los datos. El parámetro Dir es uno de los que más difiere de las observaciones, estas diferencias pueden estar asociadas con la resolución direccional utilizada en el modelo numérico. Por otro lado, las diferencias que se aprecian en el parámetro integral de T_{m01} puede ser ocasionado por las limitaciones en la resolución del espectro observado, ya que sólo se tiene información hasta la frecuencia de 0.2 Hz, mientras que en el modelo numérico SWAN la frecuencia máxima es de 0.7 Hz, lo cual influye en la estimación de T_{m01} . Finalmente, en los parámetros F_{spr} y D_{spr} se presentan ciertas discrepancias en las estimaciones, lo cual puede ser atribuido a la incertidumbre en las condiciones de frontera.

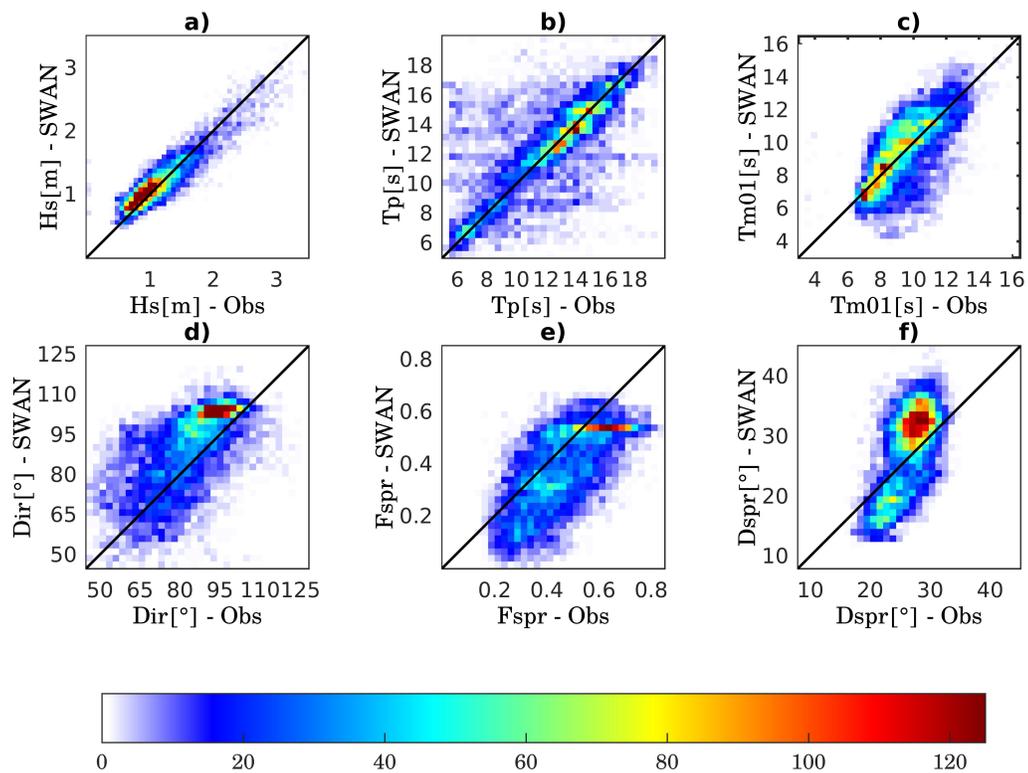


Figura 7. Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación ITS, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.

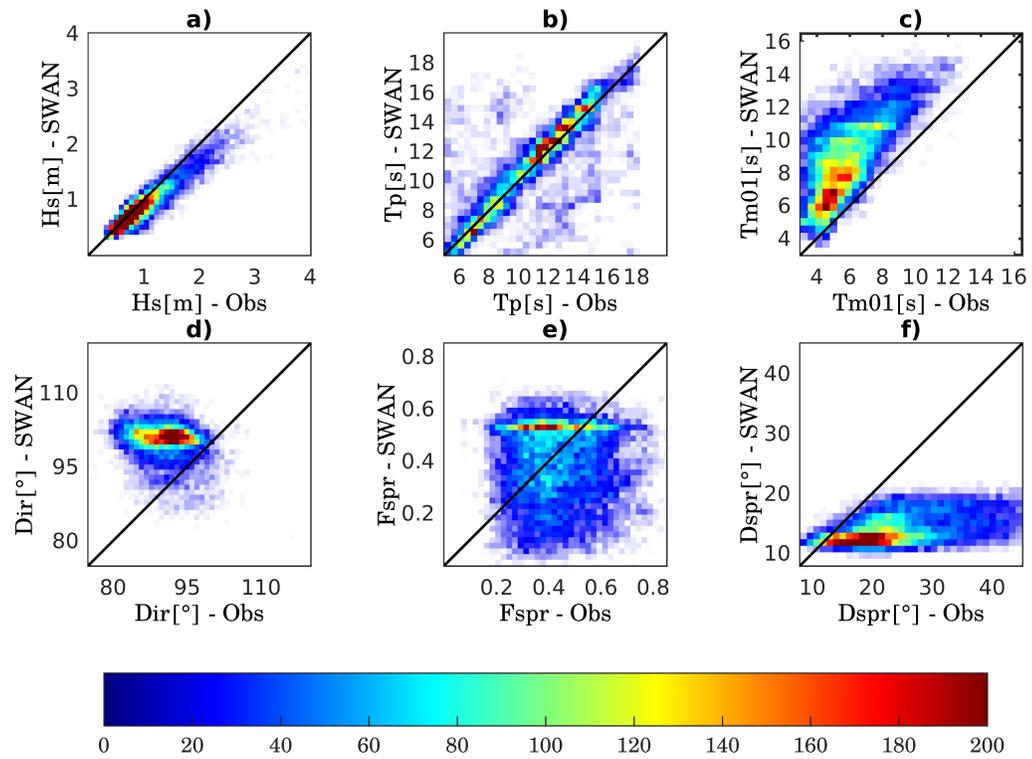


Figura 8. Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación PH, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.

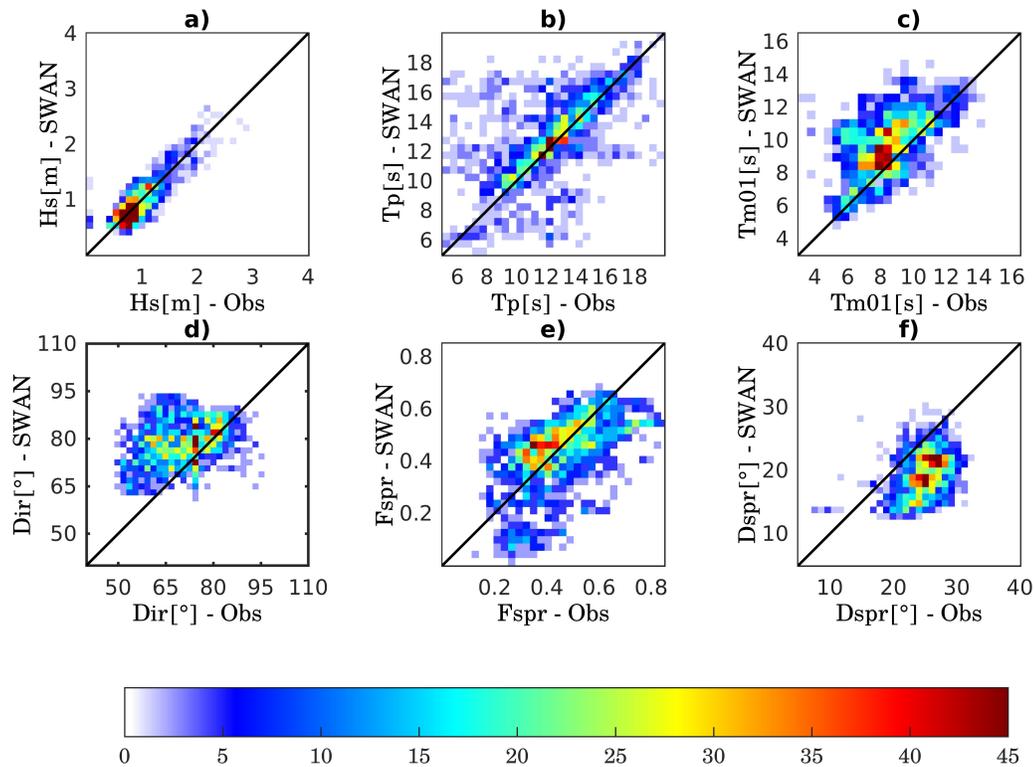


Figura 9. Comparación de los resultados de los parámetros integrales H_s , T_p , T_{m01} , Dir , F_{spr} y D_{spr} obtenidos a partir de la simulación numérica y estimados a partir de las observaciones con los ADCP. Estos corresponden a la estación PM, y la barra de colores indica la cantidad de datos, mientras que la línea negra es correspondencia de la relación 1 a 1.

Adicionalmente, de acuerdo a Yang *et al.* (2017), se estimaron cuatro valores estadísticos para evaluar el rendimiento del modelo numérico SWAN en la predicción de los seis parámetros integrales del oleaje antes descritos, con la finalidad de cuantificar las diferencias entre observaciones y los resultados de la simulación numérica. Los valores estadísticos calculados fueron: la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), el sesgo (Bias, en inglés), el índice de dispersión (SI, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación R.

El RMSE es una medida de la desviación estándar de los errores cuadráticos de las diferencias entre valores medidos y los resultados del modelo, y se estima mediante,

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P - M)^2}{N}}, \quad (23)$$

donde N se refiere al número de observaciones, M son los valores medidos con las observaciones realizadas por los ADCP y P son los valores resultantes del modelo.

El sesgo representa el promedio de las diferencias entre las observaciones y resultados y es calculado como,

$$\text{sesgo} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P - M). \quad (24)$$

El índice de dispersión SI es el valor de RMSE normalizado con el promedio de los valores medidos de las observaciones \bar{M} , tal que,

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{M}}. \quad (25)$$

El coeficiente de correlación R representa una medida de la relación lineal entre las observaciones y los resultados numéricos obtenidos del modelo, y se calcula como,

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M - \bar{M})(P - \bar{P})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (M - \bar{M})^2\right) \left(\sum_{i=1}^N (P - \bar{P})^2\right)}} \quad (26)$$

Los resultados obtenidos de RMSE, el sesgo, el SI y R se muestran en la Tabla 2 para cada estación. Los valores de correlación R correspondientes al parámetro integral H_s de las estaciones en ITS y PH son cercanos a 1. En cambio, los resultados de la estación ubicada en PM presentan las mayores diferencias entre los valores obtenidos de las observaciones y del modelo. Por otro lado, los resultados de la dirección promedio Dir , el F_{spr} y el D_{spr} en todas las estaciones presentan la mayor discrepancia con las observaciones, donde los valores de R se encuentran lejos del valor 1. Lo anterior se le atribuye a la imposición de los parámetros F_{spr} y D_{spr} en las condiciones de frontera del modelo numérico SWAN. Mientras que el error en la estimación del parámetro Dir puede ser debido a la resolución direccional del modelo, la cual fue de 5° .

Las diferencias obtenidas en la validación de los tres sitios al estimar los seis parámetros integrales del oleaje antes mencionados, puede ser también debido a la profundidad, y la cantidad de los datos dispo-

Tabla 2. Valores estadísticos de RMSE, sesgo, SI y R de la comparación de los resultados numéricos y observaciones al estimar los parámetros integrales del oleaje, para las estaciones de ITS, PM y PH.

ITS						
	H_s [m]	T_p [s]	T_{m01} [s]	Dir [°]	F_{spr}	D_{spr} [°]
RMSE	0.21	2.71	1.54	14.62	0.15	5.55
sesgo	-0.02	-0.29	0.11	-5.80	0.08	-1.42
SI	0.18	0.22	0.16	0.17	0.32	0.21
R	0.92	0.64	0.69	0.61	0.65	0.61
PM						
	H_s [m]	T_p [s]	T_{m01} [s]	Dir [°]	F_{spr}	D_{spr} [°]
RMSE	0.30	2.64	2.10	12.81	0.13	6.58
sesgo	0.004	-0.51	-1.25	-8.43	0.02	5.49
SI	0.31	0.21	0.25	0.18	0.29	0.26
R	0.73	0.57	0.55	0.30	0.55	0.34
PH						
	H_s [m]	T_p [s]	T_{m01} [s]	Dir [°]	F_{spr}	D_{spr} [°]
RMSE	0.24	2.45	3.42	11.70	0.21	14.80
sesgo	0.12	-0.13	-2.97	-9.40	0.05	11.61
SI	0.23	0.22	0.58	0.13	0.48	0.57
R	0.94	0.72	0.70	0.23	0.16	0.50

nibles en las observaciones. El sitio de PH se encuentra mas cerca de la costa y además la profundidad es menor, por lo que la malla computacional no tiene la suficiente resolución para resolver procesos asociados con la interacción de las olas y el fondo. En cambio en PM la cantidad de datos disponibles de las observaciones es menor que en comparación con los otros dos sitios, por lo que puede influir en la estimación de los parámetros y la significancia estadística.

Por otra parte, los valores estadísticos obtenidos para los sitios de ITS y PH son similares a los resultados obtenidos en Yang *et al.* (2017) al comparar observaciones y resultados del modelo numérico SWAN del parámetro integral H_s , a pesar de que son diferentes regiones de estudio. En sus resultados, también coinciden los bajos valores estadísticos obtenidos en Dir , a lo que le atribuyen la alta incertidumbre en la dirección de las observaciones y de los resultados numéricos. Sin embargo, con los resultados semejantes obtenidos, se determina la validación del modelo numérico SWAN en la región de estudio de este trabajo. En los análisis de los resultados de las simulaciones numéricas bajo la presencia de los dispositivos CEO, se tienen presente las limitaciones obtenidas del modelo al estimar los seis parámetros integrales del oleaje.

A modo de muestra gráfica de la comparación de las observaciones y resultados de la simulación numérica, en la Figura 10 se muestra una serie temporal de la altura significativa. Esta gráfica representa los

resultados obtenidos durante el mes de agosto de 2015, el cual es representativo de verano por tener valores más altos de H_s . En la Figura se observa que los valores mayores de H_s de las observaciones ocurren en los primeros y últimos días de agosto, mientras que el mínimo ocurre aproximadamente a mediados de ese mes. Se observa que los resultados de los valores de H_s obtenidos de las simulaciones numéricas son similares a las observaciones, dado que los valores mínimos y máximos se encuentran relativamente en las mismas fechas y solo en algunos casos se observa que el modelo sobreestima H_s .

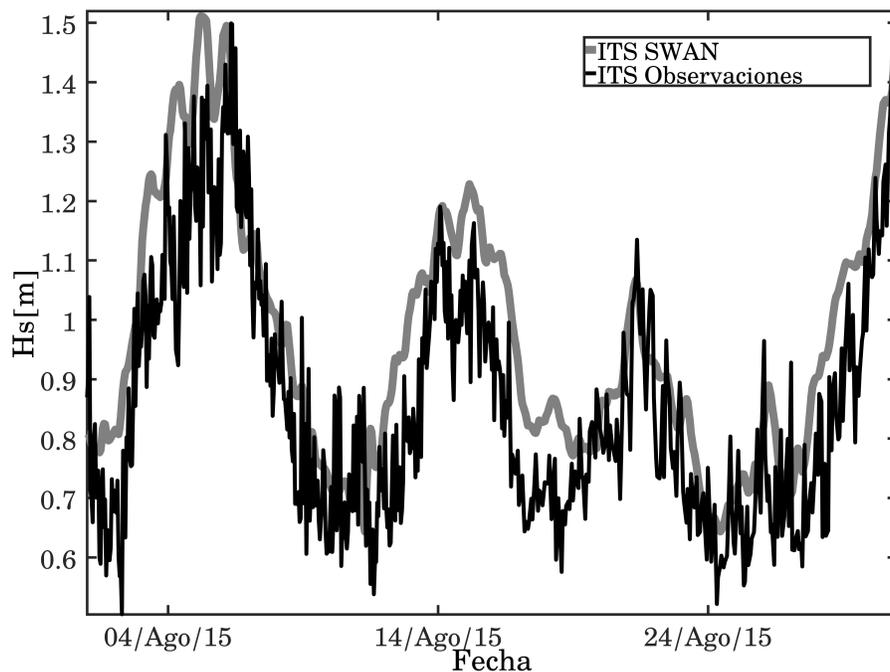


Figura 10. Serie temporal de los resultados obtenidos con el modelos numérico y a partir de las observaciones del parámetro integral H_s en la estación de ITS en el mes de agosto de 2015.

Finalmente, en la Figura 11 se presenta como ejemplo de los resultados numéricos y de las observaciones, la evolución temporal del espectro de la energía en función de la frecuencia correspondiente al mes de agosto de 2015. La densidad de energía mostrada, es un rango de frecuencias de 0.03 Hz hasta 0.15 Hz, en el cual se ubica la mayor densidad energética. Además, en esta figura se observa que los resultados del modelo SWAN suavizan la densidad de la energía, y presentan menor variabilidad en comparación con las observaciones. Lo anterior se le atribuye a la resolución espectral del modelo numérico SWAN, la cual es limitada en las frecuencias. Aún así, en la comparación de las observaciones y resultados de

la simulación numérica, se observa que el modelo reproduce la ubicación de los picos energéticos, así como, el oleaje local que se encuentra en las altas frecuencias y el oleaje generado por tormentas lejanas localizado en las bajas frecuencias.

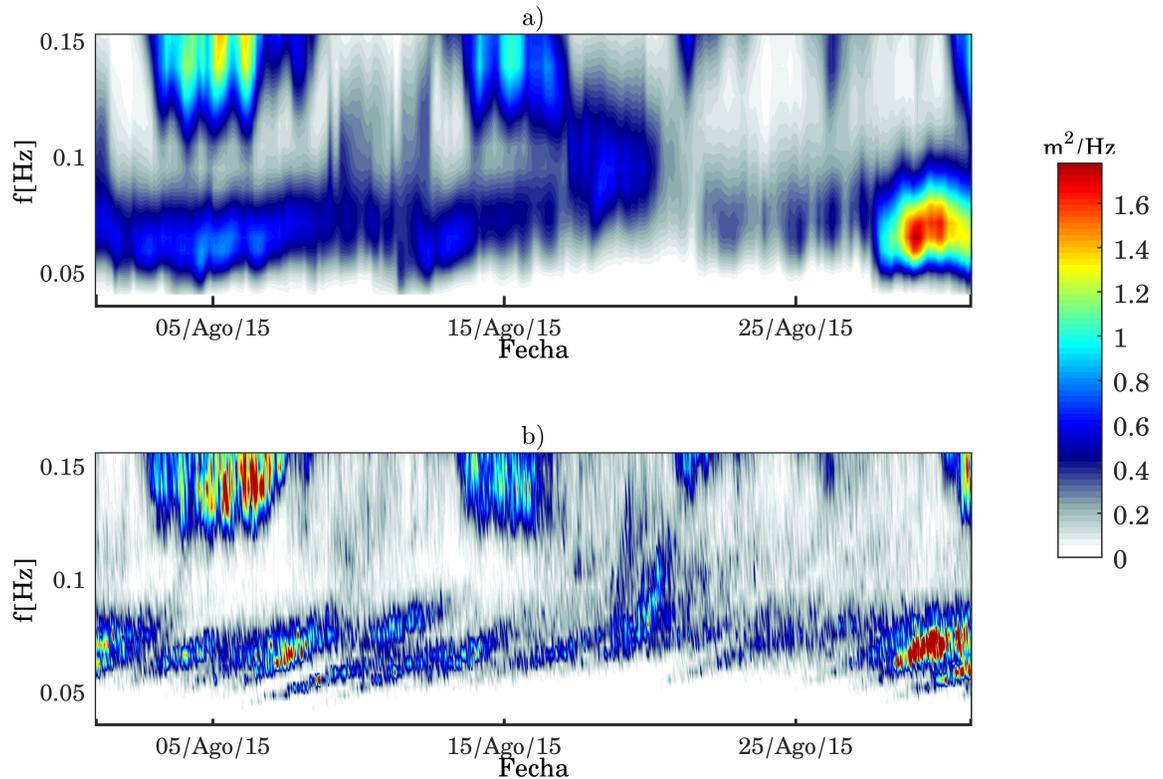


Figura 11. Comparación de las a) observaciones y b) resultados del modelo numérico SWAN correspondiente a la evolución temporal del espectro de energía en función de la frecuencia para la estación de ITS en agosto de 2015.

2.3. Representación de los dispositivos CEO en el modelo SWAN

Los dispositivos CEO fueron representados en el modelo numérico SWAN como obstáculos absorbentes de energía. Los obstáculos se implementan mediante el coeficiente de transmisión, K_t , que representa el total de la energía transmitida con respecto a la energía incidente del oleaje (The SWAN manual version 41.20AB, 2019).

En este trabajo se utiliza la versión SNL-SWAN (*Sandia National Laboratories - SWAN*, por sus siglas

en inglés), la cual es una versión del modelo SWAN que tiene un módulo para la incorporación de los dispositivos CEO en los cálculos numéricos. Este módulo permite el cálculo del K_t mediante información del rendimiento característico de los dispositivos CEO, como la función RCW (*Relative Capture Width*, por sus siglas en inglés), o bien, mediante la matriz de potencia que determina la potencia absorbida en función de combinaciones de los parámetros integrales H_s y T_p (Chang *et al.*, 2016).

Se utilizó la función RCW con dependencia de la frecuencia $RCW(f)$, que está definida como la relación entre la potencia absorbida por el dispositivo CEO, $P_{CEO}(f)$, y la potencia incidente del oleaje, $P_{incidente}(f)$, y matemáticamente se muestra como,

$$RCW(f) = \frac{P_{absorbida}(f)}{P_{incidente}(f)} = \frac{P_{CEO}(f)}{\rho g C_g S(f)}, \quad (27)$$

donde $P_{incidente}(f)$ se calcula en función de la densidad del agua ρ , la aceleración de la gravedad g , el espectro en frecuencia del oleaje $S(f)$, y la velocidad de grupo C_g , la cual está dada en función del número de onda k y la profundidad h , como:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}. \quad (28)$$

El número de onda k y la frecuencia angular ω , están relacionadas directamente a través de la relación de dispersión,

$$\omega^2 = gk \tanh kh, \quad (29)$$

donde $\omega = 2\pi f$.

El coeficiente de transmisión K_t se puede representar mediante la relación entre la altura de la ola incidente y la altura de la ola a sotavento del obstáculo (30).

$$K_t = \frac{H_{sotavento}}{H_{incidente}}, \quad (30)$$

donde el cuadrado de K_t relaciona la potencia del oleaje incidente y la potencia a sotavento del obstáculo Chang *et al.* (2016), de forma que

$$K_t^2 = \frac{P_{\text{sotavento}}}{P_{\text{incidente}}} = \frac{P_{\text{incidente}} - P_{\text{absorbida}}}{P_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{P_{\text{absorbida}}}{P_{\text{incidente}}}, \quad (31)$$

por lo que la función RCW se puede expresar como el valor complementario de K_t^2 , es decir,

$$RCW(f) = 1 - K_t^2 = \frac{P_{\text{absorbida}}(f)}{P_{\text{incidente}}(f)}. \quad (32)$$

En este trabajo se utiliza el $RCW(f)$ del dispositivo CEO conocido como *Flap-Type*, el cual se caracteriza por tener una aleta rectangular anclada al fondo del mar, las dimensiones de este dispositivo son de 26 m de ancho, por una altura de 13 m y espesor de 1 m. Este tipo de dispositivo CEO es funcional en profundidades entre 10 y 20 m y el nombre comercial más conocido es *Oyster* (Renzi *et al.*, 2014). Los valores de RCW en función de la frecuencia mostrados en la Figura 12 representan el desempeño del dispositivo *Flap-Type* y, fue utilizado para simular la absorción de energía del oleaje.

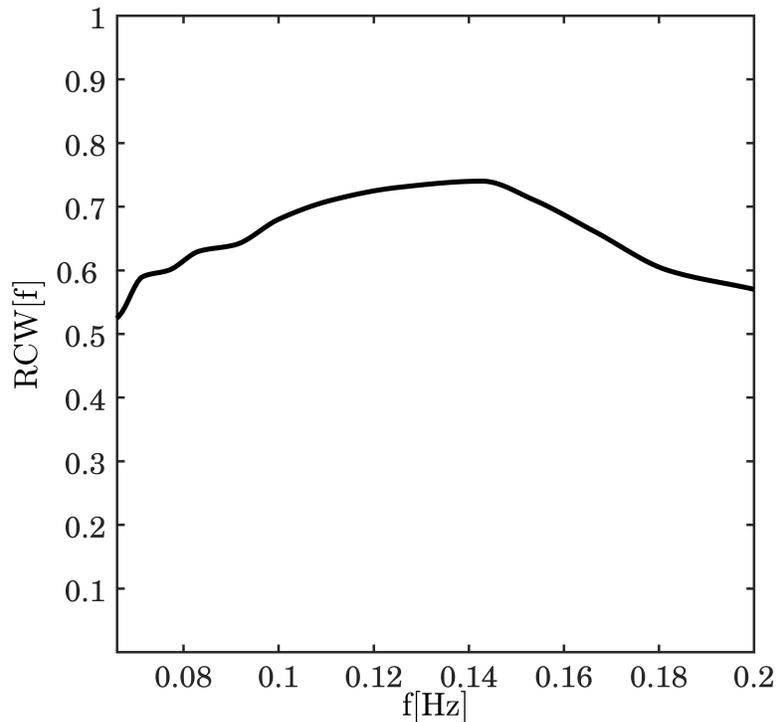


Figura 12. Valores de RCW en función de la frecuencia correspondientes al principio de funcionamiento del dispositivo CEO *Flap-Type*, basado en información obtenida de Renzi *et al.* (2014).

El principio del funcionamiento del dispositivo CEO *Flap-Type* consiste en la absorción de energía que proviene del movimiento horizontal de las partículas de agua debido a las olas. El CEO *Flap-Type* debe estar colocado perpendicularmente a la dirección principal de propagación del oleaje, de tal forma que la aleta en funcionamiento por acción de las olas, se mueva hacia atrás y hacia adelante, con el objetivo de aprovechar el máximo rango de movimiento. El dispositivo CEO *Flap-Type* se compone por un sistema hidráulico con pistones para convertir la energía del oleaje en energía mecánica y finalmente generar energía eléctrica (Whittaker y Folley, 2011).

2.4. Descripción de los experimentos numéricos

Se diseñaron experimentos con diferentes configuraciones de arreglos de dispositivos CEO *Flap-Type* para realizar las simulaciones numéricas bajo la presencia de estos. Se seleccionó un área dentro del dominio utilizado en la validación del modelo numérico para ubicar los dispositivos CEO *Flap-Type*. La selección

del área se realizó con base en la profundidad necesaria para la operación de los CEO *Flap-Type*, por la cercanía a la costa, y por la presencia de olas con mayor altura significativa persistente en el periodo de tiempo simulado.

A partir del área seleccionada se generó una malla anidada con resolución espacial de 26 m, correspondiente a las dimensiones del ancho de los dispositivos CEO *Flap-Type*. En la Figura 13 se presenta el parámetro integral H_s correspondiente a un tiempo, específicamente el 1 de enero de 2015 a las 12 AM. Los colores de la barra indican los valores de H_s . En esta misma figura se muestra el subdominio de la malla anidada delimitada por la línea continua de color rojo y, en línea discontinua el área en donde fueron ubicados los CEO *Flap-Type*.

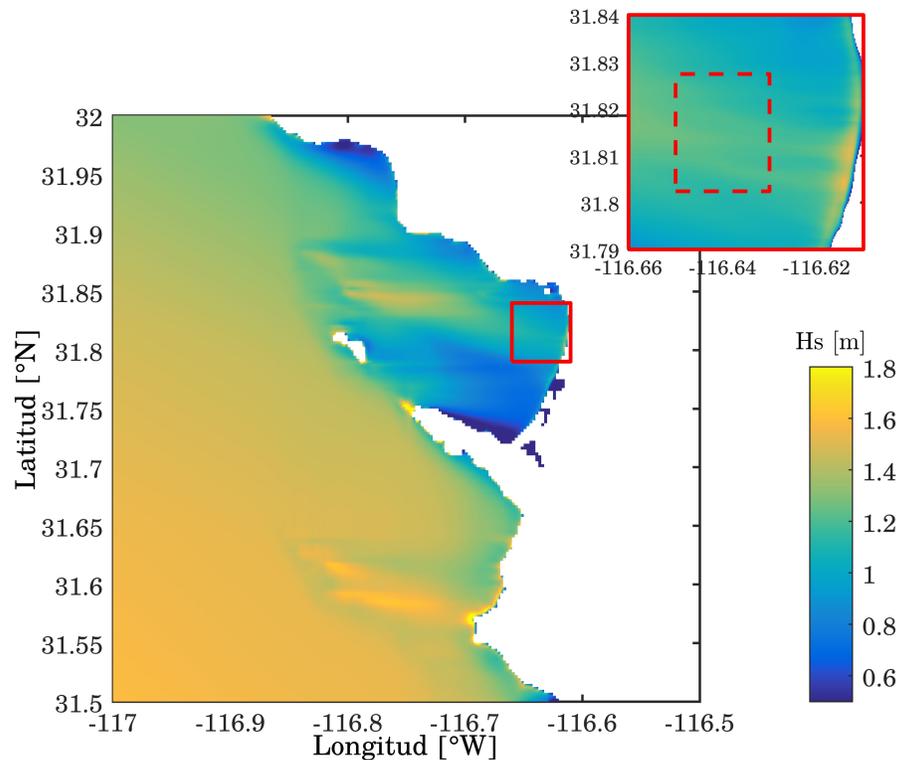


Figura 13. Mapa de H_s correspondiente a un tiempo, específicamente el 1 de enero de 2015 a las 12 AM. Además, se muestra la ubicación de la malla anidada que se representa mediante la línea continua de color rojo y, en línea discontinua se indica el área en donde fueron ubicados los CEO *Flap-Type*.

Con la finalidad de escoger los casos más representativos para realizar las simulaciones numéricas, se identificaron las combinaciones de H_s y T_p que ocurrieron con mayor frecuencia mediante la función de distribución de probabilidad conjunta considerando los resultados correspondientes a invierno (21 de diciembre a 20 de marzo) y verano (21 de junio a 23 de septiembre) de 2015 en todos los puntos de la

mallada anidada.

Las Figuras 14 y 15, muestran los resultados de la función de distribución de probabilidad conjunta, donde las barras de colores representan la cantidad de ocurrencias de las combinaciones de H_s y T_p . Las combinaciones ocurridas con mayor frecuencia durante el invierno de 2015 estuvieron delimitadas con valores de T_p entre 11.5 y 13 s, y de H_s entre 1.05 y 1.15 m. En el caso de verano del año 2015, T_p estuvo limitado entre 6 a 6.5 s, y H_s entre 0.7 y 0.8 m.

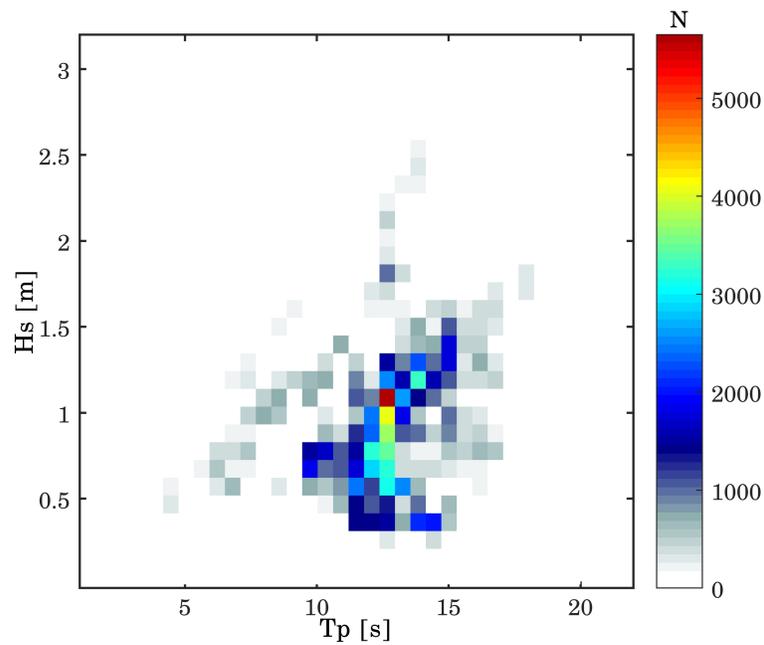


Figura 14. Resultados de la función de distribución de probabilidad conjunta, donde N es la cantidad de ocurrencias de las combinaciones de H_s y T_p en la temporada de invierno del año 2015.

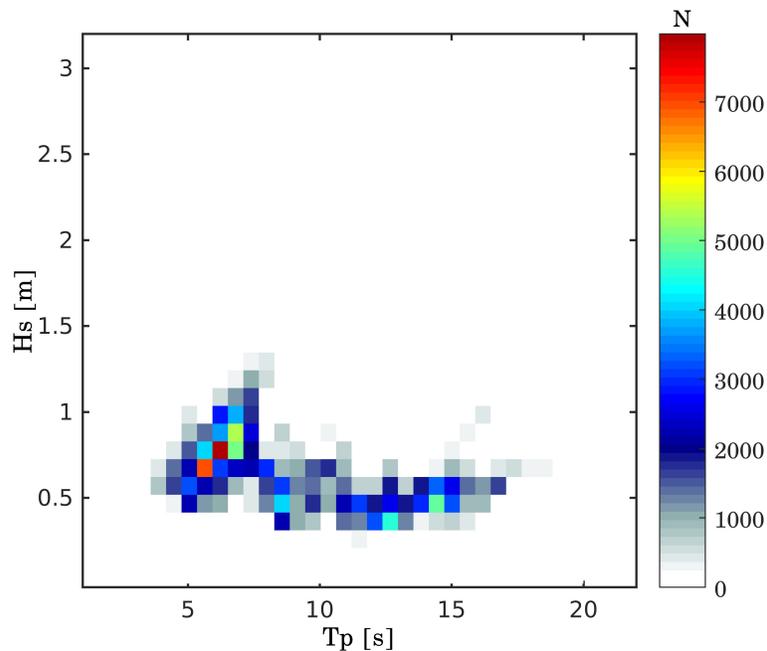


Figura 15. Resultados de la función de distribución de probabilidad conjunta, donde N es la cantidad de ocurrencias de las combinaciones de H_s y T_p en la temporada de verano del año 2015.

Se escogió un evento asociado a un tiempo específico como representativo de los rangos de las combinaciones de H_s y T_p (un evento de invierno y uno de verano). Esto se hizo con el fin de conservar la distribución y estructura espacial de las condiciones de frontera en las simulaciones numéricas. Más adelante se mencionan como el caso de invierno y el caso de verano.

Con la finalidad de analizar los términos fuentes asociados con la disipación de energía, se consideró un campo de vientos homogéneo y estacionario dentro de la malla anidada en las simulaciones numéricas con dispositivos CEO. En el caso de invierno, se definió un viento con rapidez de 2 m/s y con dirección de propagación hacia los 74°E (medido desde el este en sentido antihorario). Para el caso de verano se utilizó una rapidez del viento de 1.3 m/s y con dirección de propagación hacia los 165°E (medido desde el este en sentido antihorario). Estos datos de viento fueron tomados de la base de datos REDMAR-CICESE, cuya estación meteorológica (Vaisala-WXT520) se encuentra localizada en el puerto de Ensenada, México ($31^\circ50.894'\text{N}$, $116^\circ37.067'\text{W}$).

2.4.1. Diseño de arreglos con dispositivos CEO para simulaciones numéricas

Se implementaron en las simulaciones numéricas cuatro diseños de arreglos con dispositivos CEO *Flap-Type* para evaluar el efecto de estos en diferentes experimentos. En la Tabla 3 se muestra la información de las características de cada uno de los experimentos realizados en las simulaciones numéricas. En esta tabla se designan los títulos de cada experimento, también se indica el número de dispositivos CEO utilizados y el tipo de arreglo diseñado para cada uno. Después, se dan las distancias de separación entre los dispositivos, en el eje x (Δx [m]) y en el eje y (Δy [m]), respectivamente. Finalmente, se indica la distancia de la ubicación de los CEO a la costa.

Tabla 3. Características de los experimentos diseñados para las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO.

	No. CEO	Arreglo	Δx [m]	Δy [m]	Distancia a la costa [m]
experimento de referencia	0	-	-	-	-
experimento 1	1	unitario	-	-	~ 2500
experimento 2	5	lineal	260	-	~ 2500
experimento 3	10	lineal	260	260	~ 2240
experimento 4	25	escalonado	260	260	~ 1460

El experimento de referencia consistió en realizar las simulaciones numéricas sin dispositivos CEO, con la finalidad de tener un escenario de comparación. El experimento 1 consistió de incorporar un solo dispositivo. En los experimentos 2, 3 y 4, los arreglos implementados en la simulación numérica estuvieron conformados por más de un dispositivo CEO. La separación entre los dispositivos equivale a una distancia de diez veces la dimensión del *Flap-Type* (260m). Esta distancia permite que la interacción entre los dispositivos sea mínima, de tal modo que la absorción de energía del oleaje por parte de los CEO no sea afectada por los dispositivos cercanos (Babarit, 2013; O'Dea *et al.*, 2018).

En el experimento 2 se incluyen 5 dispositivos CEO *Flap-Type* en un arreglo lineal colocado de norte a sur, en el cual la distancia de los CEO a la costa fue de aproximadamente 2500 m. En el Experimento 3 se incorporaron 10 dispositivos CEO, dos arreglos de 5 dispositivos alineados de norte a sur, para este experimento la distancia a la costa es de aproximadamente 2240 m.

Finalmente, en el Experimento 4 se colocaron 25 dispositivos CEO en un arreglo conocido como escalonado (cinco arreglos de 5 dispositivos colocados intercaladamente y alineados de norte a sur), que permite una mayor tasa de absorción de energía del oleaje Beels *et al.* (2010). En este experimento, la

distancia del último arreglo de CEO a la costa fue de aproximadamente 1460 m.

En el siguiente capítulo se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO y se muestra gráficamente el arreglo en cada uno de los experimentos mencionados.

Capítulo 3. Resultados y discusiones

A partir del análisis de los espectros direccionales resultantes de las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO, se estimaron algunos parámetros integrales para analizar el efecto de los CEO en el oleaje. Además, también se analizan los resultados de las simulaciones numéricas a través de los términos fuente de disipación de energía.

En los resultados se muestra una estela debido al cambio de magnitud de los parámetros integrales. Cuando el frente de olas incide sobre un objeto sólido o sobre un obstáculo, parte de la energía del oleaje incidente se refleja, otra fracción se transmite y el resto puede ser absorbida (Newman, 1975). En el caso de los dispositivos CEO, la parte que se transmite es gracias al efecto de la distribución direccional, la cual permite que la energía del oleaje incidente se propague a sotavento de los obstáculos (dispositivos CEO). El área a sotavento se conoce como zona de sombra y se muestra gráficamente como una estela O'Dea *et al.* (2018), y se observa consistentemente en los resultados obtenidos de esta tesis.

3.1. Efectos en la altura significativa

La altura significativa, H_s , es un parámetro integral del oleaje que se estima con la ecuación (16) a partir de los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas bajo la presencia de dispositivos CEO *Flap-Type*. Se calculó el cambio de H_s como la diferencia de este parámetro entre un escenario sin dispositivos CEO (Experimento de referencia) y con dispositivos CEO, como se muestra en la ecuación (33),

$$\Delta H_s(\%) = \frac{H_s(\text{conCEO}) - H_s(\text{sinCEO})}{H_s(\text{sinCEO})} * 100. \quad (33)$$

En la Figuras 16 y 17 se muestran los resultados de ΔH_s obtenidos con los experimentos 1, 2, 3 y 4 correspondientes a los casos de invierno y verano (descritos en el capítulo 2). En el caso de invierno se observan mayores valores de ΔH_s , en comparación con el caso de verano. Lo que indica que en el caso de invierno hay una mayor absorción de energía por parte de los CEO. En general, se observa que los valores de ΔH_s disminuyen (es decir, se acercan a cero) a medida que se reduce la distancia a la costa.

Esto está asociado a la distribución direccional del espectro de oleaje (en inglés, *directional spreading*) que hace que las olas que se propagan a sotavento de los dispositivos CEO reciban energía proveniente de las celdas computacionales aledañas. Esto se puede entender como una disminución de la zona de sombra a lo largo de la dirección de propagación hacia la costa.

En el experimento 4 se observa una mayor reducción de la altura significativa respecto a los demás experimentos. En este caso, la absorción de energía del oleaje es mayor porque hay más cantidad de dispositivos CEO. Adicionalmente, en este experimento, como la distancia entre los dispositivos CEO y la costa es menor, el efecto de la zona de sombra es mayor (O'Dea *et al.*, 2018).

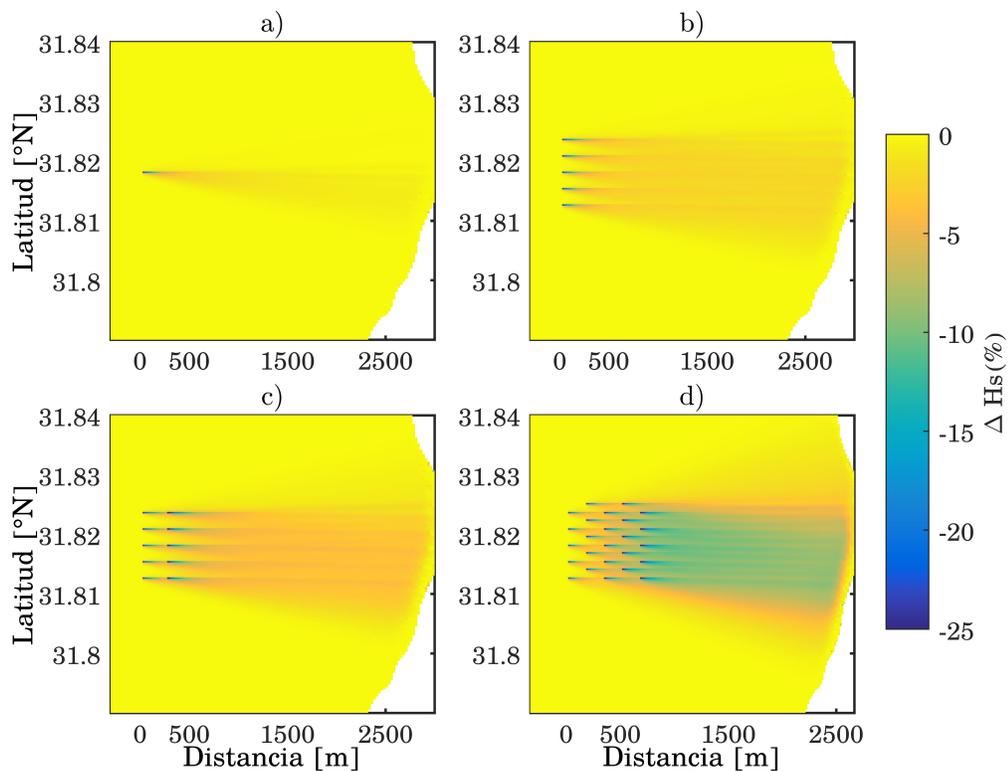


Figura 16. Resultados de ΔH_s , correspondiente a los Experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d) en el caso de invierno.

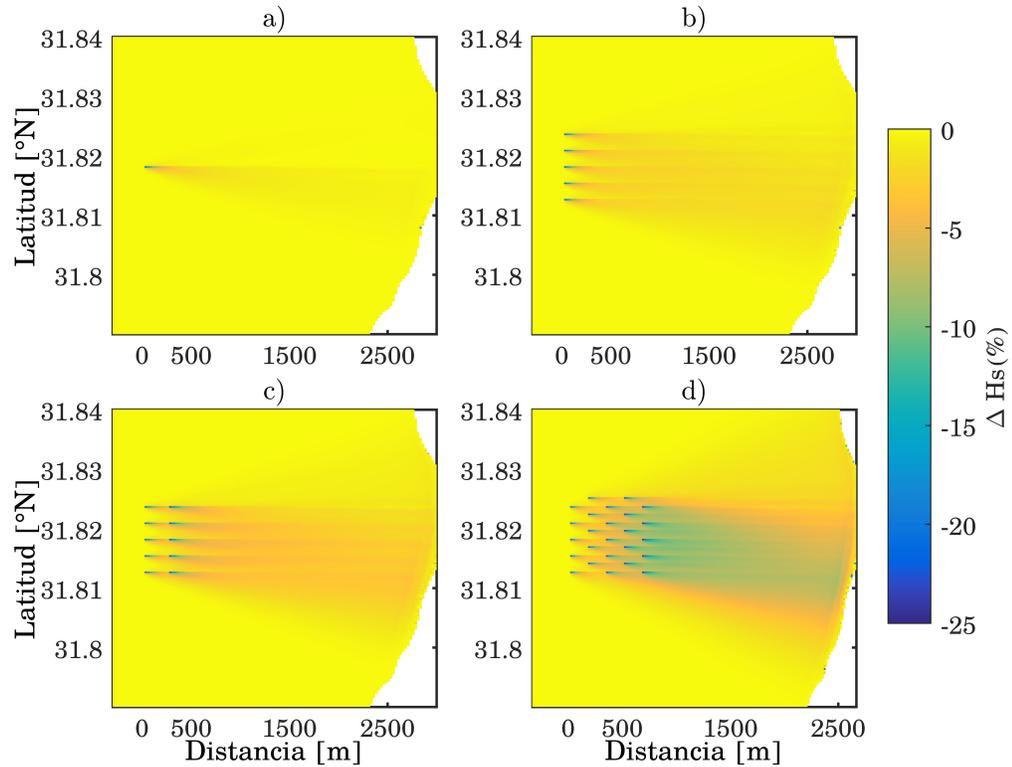


Figura 17. Resultados de ΔH_s , correspondiente a los Experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d) en el caso de verano.

En las Figuras 18 y 19 se presentan los resultados de ΔH_s obtenidos en transectos de norte a sur de los cuatro experimentos, correspondientes a los casos de invierno y verano, respectivamente. El eje vertical representa la distancia que hay entre los dispositivos, donde el cero es un valor de referencia que coincide con el centro del dispositivo CEO *Flap-Type* del Experimento 1. En el eje horizontal se muestra la diferencia de altura significativa, ΔH_s , correspondiente a cuatro distancias expresadas en términos de la longitud de onda (λ , 2λ , 3λ , 4λ).

Los mayores valores de la magnitud de ΔH_s se presentan a una distancia equivalente a la longitud de onda $\lambda = 128$ m en invierno y $\lambda = 50$ m en verano (línea de color azul). En ambos casos, el máximo de la magnitud de ΔH_s ocurre en el Experimento 4, donde en invierno alcanza valores de alrededor de -30%. Los resultados indican que conforme aumentan las distancias de la posición de los CEO hacia la costa (4λ , 8λ , y 12λ) los valores de ΔH_s se reducen, lo cual está asociado al efecto de la disminución de la zona de sombra.

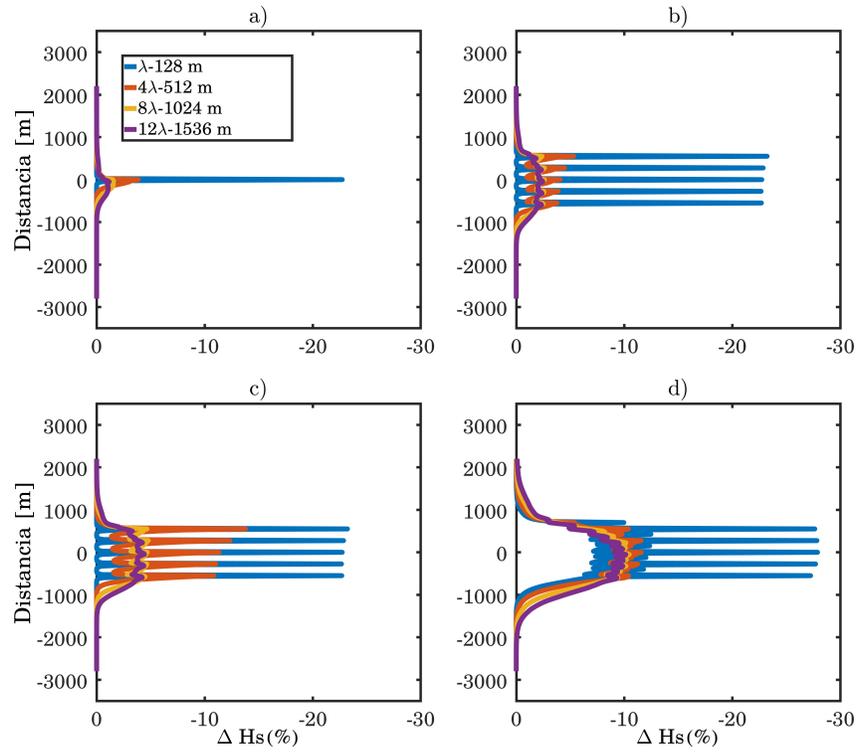


Figura 18. Resultados de ΔH_s a distancias de $\lambda = 128$ m, $4\lambda = 512$ m, $8\lambda = 1024$ m y $12\lambda = 1536$ m de la simulación numérica del caso de invierno, correspondientes a los experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d).

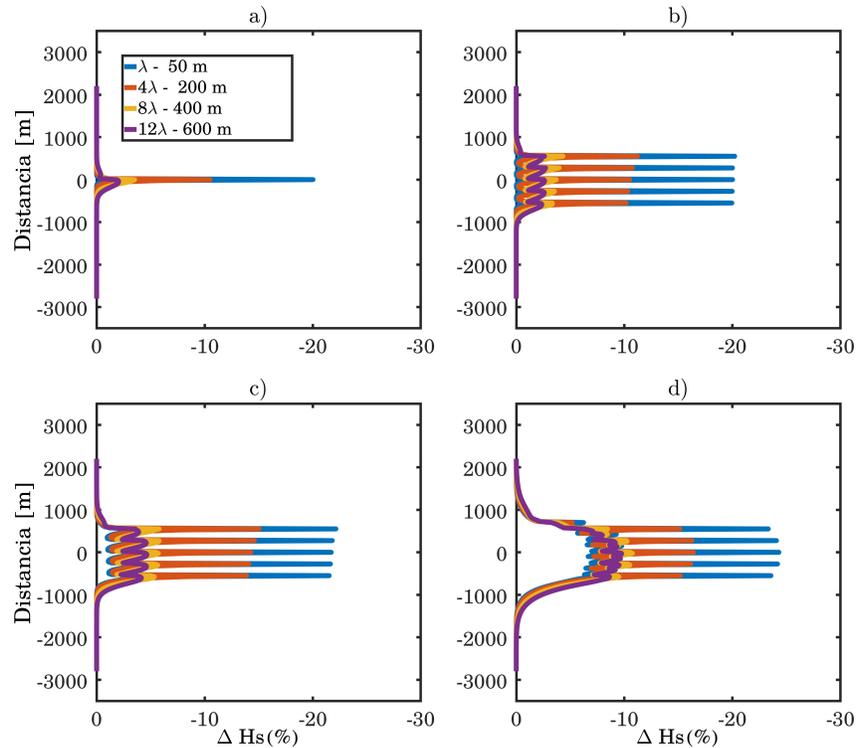


Figura 19. Resultados de ΔH_s a distancias de $\lambda = 50$ m, $4\lambda = 200$ m, $8\lambda = 400$ m y $12\lambda = 600$ m de la simulación numérica del caso de verano, correspondientes a los experimentos 1 a), 2 b), 3 c) y 4 d).

3.2. Efectos en el periodo asociado al pico espectral

A partir de las simulaciones numéricas realizadas en los experimentos 1, 2, 3 y 4 se obtuvieron resultados del periodo asociado al pico espectral, T_p , estimados con la ecuación (17). La diferencia de T_p entre el experimento de referencia y los experimentos 1,2,3 y 4, se presentan en términos de porcentaje, ΔT_p , como,

$$\Delta T_p(\%) = \frac{T_p(\text{conCEO}) - T_p(\text{sinCEO})}{T_p(\text{sinCEO})} * 100. \quad (34)$$

En la Figura 21 y 20 se presentan los resultados de ΔT_p , en estos se observa una zona de sombra similar a la obtenida con el análisis de ΔH_s . Estos resultados corresponden al caso de verano e invierno respectivamente. Los valores de ΔT_p resultantes son positivos y negativos a sotavento de los dispositivos CEO, lo cual puede ser debido a un traslado del pico del espectro hacia las altas frecuencias (cambio

positivo) y hacia las bajas frecuencias (cambio negativo). Lo anterior sugiere que hay disipación de la energía en las bajas frecuencias cuando el cambio de ΔT_p es positivo (aumenta T_p en presencia de dispositivos CEO) y disipación de la energía en las altas frecuencias cuando el cambio de ΔT_p es negativo (disminuye T_p en presencia de dispositivos CEO). Las diferencias que se presentan en el caso de verano e invierno consiste en que la mayoría de los resultados de los valores de ΔT_p son negativos para el caso de verano y mayormente positivos para el caso de invierno.

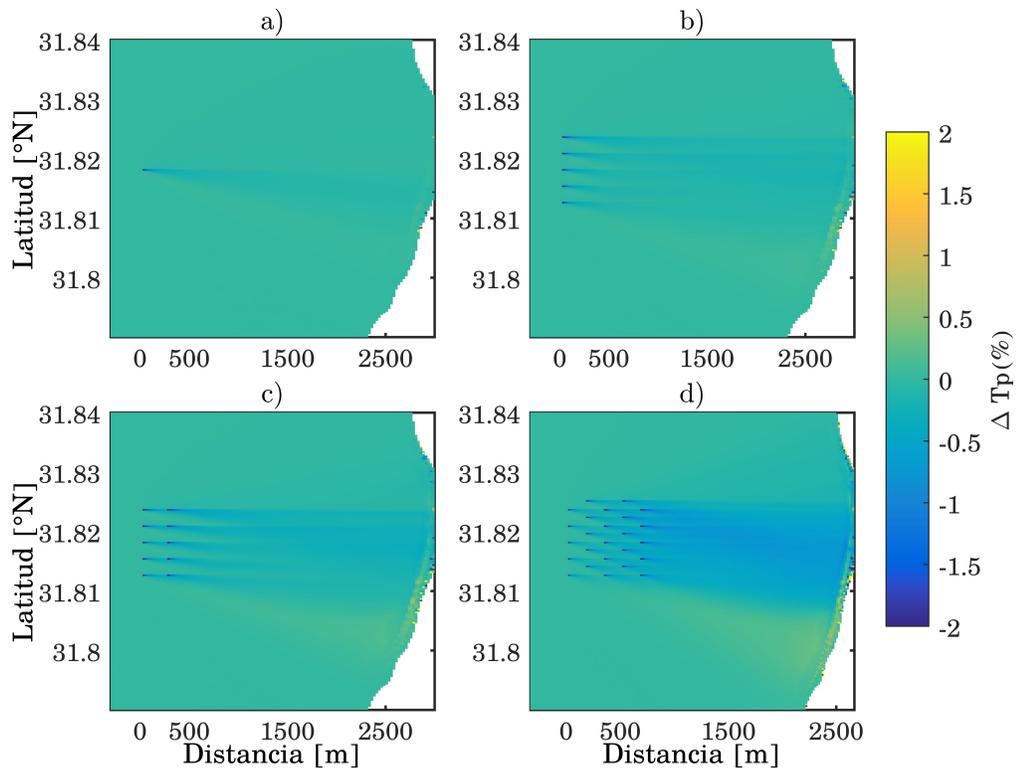


Figura 20. Resultados de ΔT_p correspondientes a la simulación numérica del caso de verano, del experimento a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4.

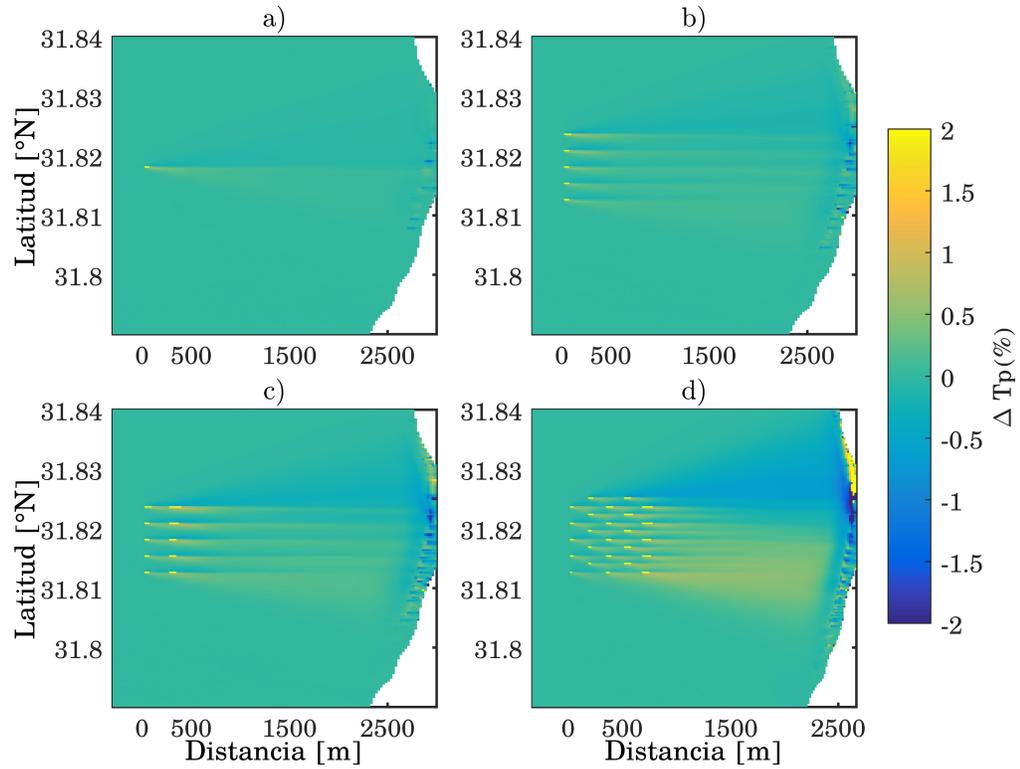


Figura 21. Resultados de ΔT_p correspondientes a la simulación numérica del caso de invierno, del experimento a) 1, b) 2, c) 3 y d) 4.

3.3. Efectos en la dirección de propagación

La estimación del parámetro integral Dir , de la ecuación (19), fue otro de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas con presencia de dispositivos CEO. En la Figura 22 se muestra la diferencia de este parámetro en porcentaje como ΔDir (%) calculado como,

$$\Delta Dir(\%) = \frac{Dir(\text{conCEO}) - Dir(\text{sinCEO})}{Dir(\text{sinCEO})} * 100. \quad (35)$$

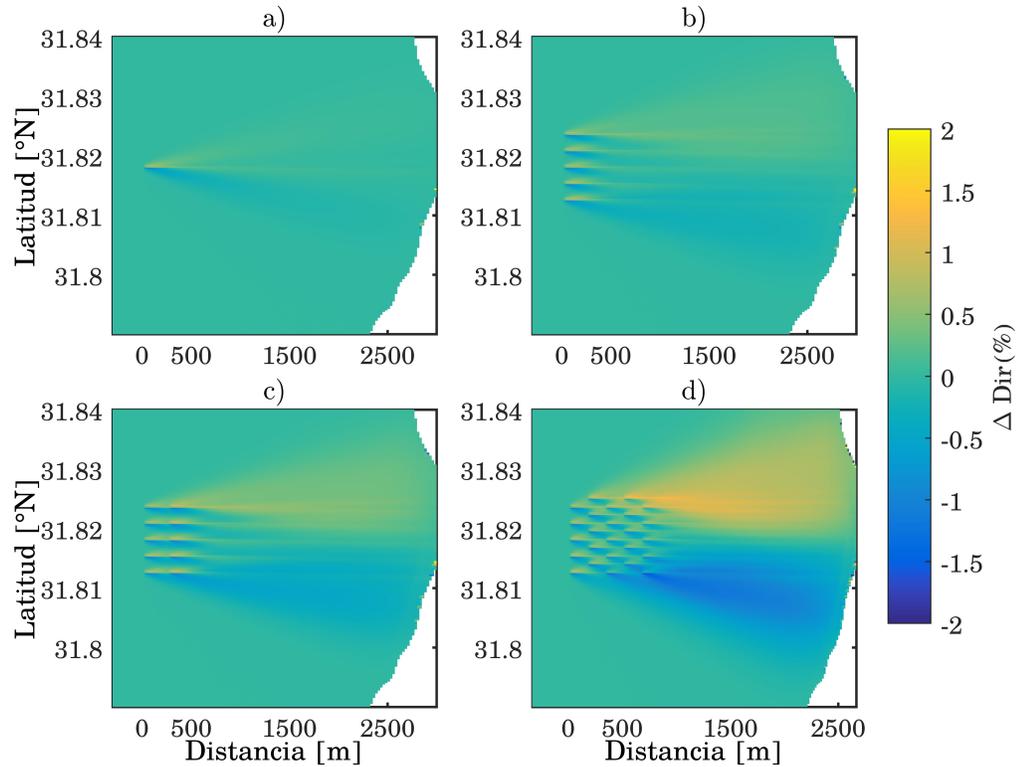


Figura 22. Resultados de $\Delta Dir(\%)$ correspondientes al periodo de simulación numérica de verano. Donde los incisos a), b), c) y d) corresponden a los experimentos 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

La Figura 22 corresponde a los resultados del caso de verano, donde los valores de $\Delta Dir(\%)$ fueron considerablemente mayores respecto al caso de invierno. Los resultados de $\Delta Dir(\%)$ indican un cambio positivo en la parte superior de la figura y negativo en la parte inferior. Se observa como el oleaje que se propaga a sotavento de los dispositivos CEO cambia ligeramente su dirección promedio hasta un $\pm 2\%$, especialmente en el experimento 4. Este cambio de dirección ocurre ante la presencia de un dispositivo CEO, es un resultado obtenido en el estudio que se presenta en O'Dea *et al.* (2018).

3.4. Efectos en los gradientes de los esfuerzos de radiación

Las componentes F_x (hacia la costa) y F_y (perpendicular a la costa) de la fuerza inducida por las olas por unidad de superficie horizontal, se pueden calcular a partir de los gradientes del esfuerzo de radiación. La fuerza resultante puede generar cambios en el nivel medio del mar e inducir circulación costera. Mediante la teoría lineal de oleaje, las componentes F_x y F_y se pueden calcular como:

$$F_x = -\frac{dS_{xx}}{dx} - \frac{dS_{xy}}{dy}, \quad (36)$$

y

$$F_y = -\frac{dS_{yx}}{dx} - \frac{dS_{yy}}{dy}, \quad (37)$$

donde S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} , y S_{yx} , son las componentes del tensor de esfuerzos de radiación, S_{ij} , que se pueden representar, usando la teoría lineal del oleaje, como función del espectro direccional $E(\omega, \theta)$, la dirección de propagación θ , el número de onda k y la profundidad h , como se muestra en las siguientes ecuaciones,

$$S_{xx} = \rho g \int \left[n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right] E d\omega d\theta, \quad (38)$$

$$S_{yy} = \rho g \int \left[n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right] E d\omega d\theta, \quad (39)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \int [n \sin \theta \cos \theta] E d\omega d\theta, \quad (40)$$

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (41)$$

donde n es la razón entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo, g es la gravedad y ρ es la densidad del agua (O'Dea *et al.*, 2018; The SWAN manual version 41.20AB, 2019).

El término dS_{yx}/dx es el resultado de la disipación de energía que puede ser debido principalmente a las olas que rompen y que inciden oblicuamente a la costa. La expresión dS_{yx}/dx representa la contribución principal en la generación de corrientes a lo largo de la costa, así que el S_{xy} medido fuera de la zona de rompiente será representativo del forzamiento (F_y) del balance total. De manera análoga ocurre con dS_{xy}/dy .

En síntesis, el tensor de esfuerzo de radiación consiste en la inyección de flujo de momento a la columna de agua debido a la disipación de la energía de las olas, que puede representarse como la reducción de altura significativa. El efecto de este tensor consiste en las corrientes hacia la costa y a lo largo de la costa, que a su vez generan transporte de sedimentos en la zona costera (O'Dea *et al.*, 2018).

Con los resultados de las simulaciones numéricas se obtiene que la presencia de los dispositivos CEO *Flap-Type* cambia de manera significativa las componentes de la fuerza inducida por el oleaje F_x y F_y . En las Figuras 23 y 24 se muestran los resultados de F_x y F_y a lo largo de transectos orientados norte-sur para diferentes distancias a sotavento de un dispositivo CEO correspondientes a los experimentos 1 y 4. Las líneas horizontales de color negro indican el ancho de captura de energía del dispositivo CEO *Flap-Type*, que corresponde a su propia dimensión de $L = 26$ m. Las distancias corresponden a diferentes longitudes de onda respectivas al caso de invierno, las cuales son $\lambda = 128$ m, $2\lambda = 256$ m, $3\lambda = 384$ m, y $4\lambda = 512$ m. Se observa que para λ , que es la distancia más cercana a la ubicación del dispositivo CEO, ocurre el máximo cambio en F_x y F_y , donde este va disminuyendo conforme aumenta λ . En el caso de F_x , en los transectos de 2λ y 3λ se observa un ligero efecto rebote y para 4λ el transecto de F_x se encuentra casi en el valor de 0. En cambio, en el caso de F_y se observa que los valores varían de un valor negativo a un valor positivo, este comportamiento puede estar asociado al cambio de dirección.

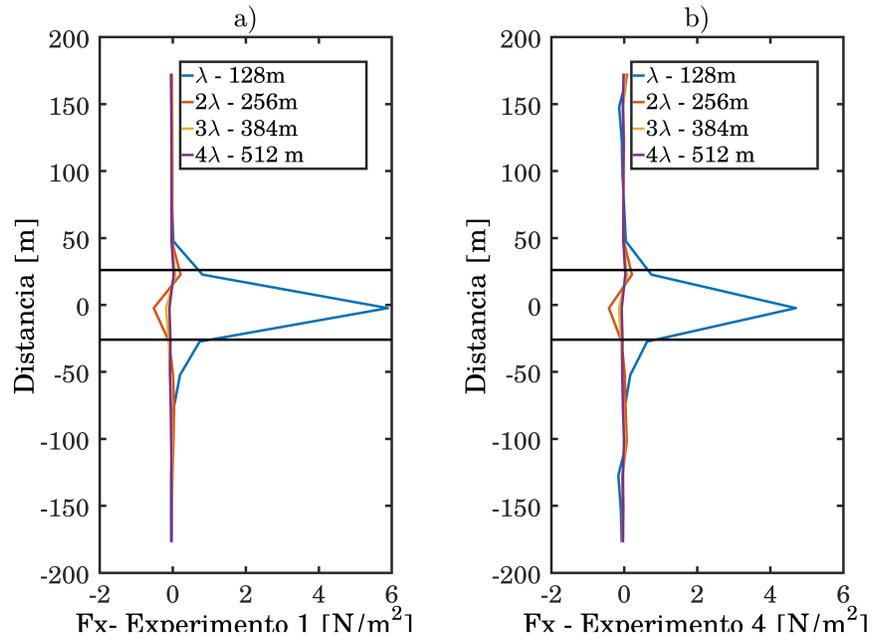


Figura 23. Resultados de F_x correspondientes a las simulaciones numéricas del periodo de invierno en los experimentos 1 a) y 4 b), a diferentes distancias de $\lambda = 128\text{m}$, $2\lambda = 256\text{m}$, $3\lambda = 384\text{m}$, y $4\lambda = 512\text{m}$.

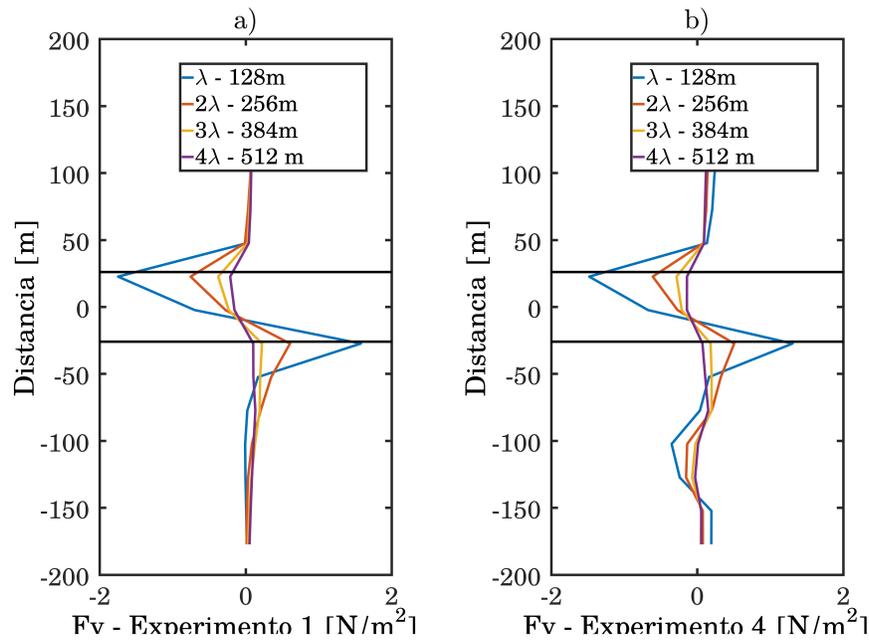


Figura 24. Resultados de F_y correspondientes a las simulaciones numéricas del periodo de invierno en los experimentos 1 a) y 4 b), a diferentes distancias de $\lambda = 128$ m, $2\lambda = 256$ m, $3\lambda = 384$ m y $4\lambda = 512$ m.

Las diferencias de los resultados entre los experimentos 1 y 4 consisten en la variabilidad espacial de F_x y F_y que se presenta en este último experimento (Experimento 4 con arreglo de 25 dispositivos CEO), dado que la presencia de los otros dispositivos CEO afecta en la absorción de energía y por tal en los resultados de la estimación de F_x y F_y . Además, los valores de F_x y F_y son de menor magnitud en los resultados del Experimento 4 en comparación con el Experimento 1, porque en ese mismo punto hay menor disponibilidad de energía para absorber.

Los cambios de F_x y F_y debido a las simulaciones numéricas realizadas bajo la presencia de dispositivos CEO ocurren cerca de la ubicación de los dispositivos. Para conocer en cuanto atribuye la presencia de los dispositivos CEO en el tensor del esfuerzo de radiación, es necesario realizar un balance completo hasta la zona de rompiente y así poder especificar si estos podrían contribuir o disminuir la generación de corrientes a lo largo y hacia la costa, que a su vez podrían impulsar el transporte de sedimentos.

3.5. Efectos en el término fuente de la disipación de energía

En esta sección se presentan y analizan los resultados del término fuente asociados con la disipación de la energía del oleaje. El análisis consistió en la comparación de los términos fuente en un escenario sin dispositivos CEO (experimento de referencia), con los resultados de los experimentos 1 (un dispositivo CEO) y 4 (25 dispositivos CEO).

Previo al análisis de los términos fuente, se compararon los espectros de la densidad de energía en función de la frecuencia, referidos en esta sección como $S(f)$, que se obtuvieron en un punto de la malla ubicado en las coordenadas -116.64°W , 31.8185°N y que está dentro de la malla anidada de las simulaciones numéricas (Figura 25). Este punto de análisis se encuentra a una distancia de una longitud de onda ($\lambda = 128\text{m}$) en el caso de invierno y $\lambda = 50\text{m}$ en el caso de verano.

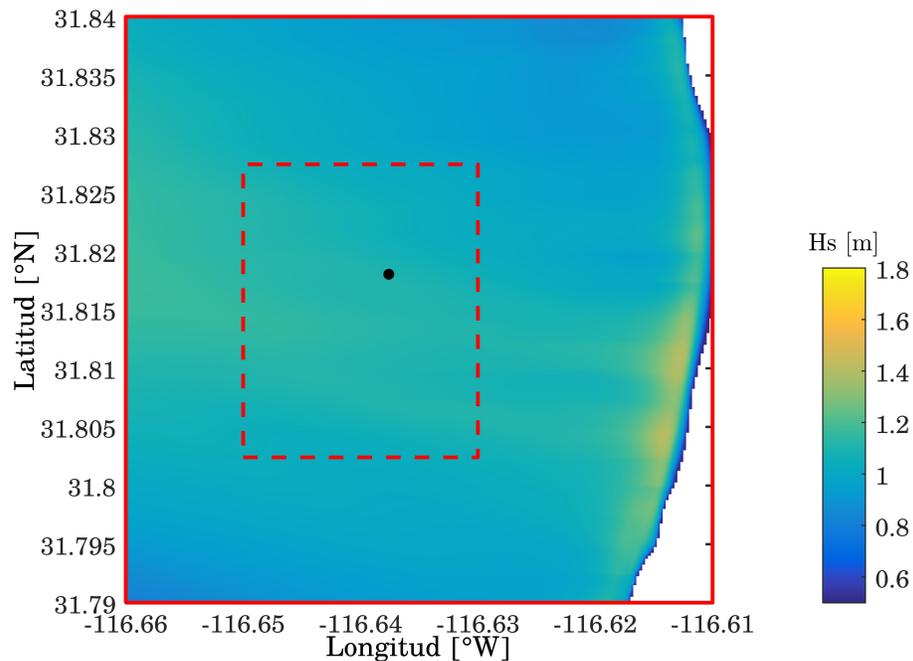


Figura 25. Área de cobertura de la malla computacional utilizada en la simulación numérica. Los colores representan la altura significativa del oleaje correspondiente al 1 de enero de 2015 a las 12 AM. La línea punteada representa el área donde se localizan los dispositivos CEO. El punto de análisis ubicado en -116.64°W , 31.8185°N para la comparación de los resultados de los términos fuente correspondientes a los experimentos 1 y 4 y el Experimento de referencia se representa con el punto negro.

En las Figuras 26 y 27 se muestran los resultados obtenidos a partir de los espectros en función de la frecuencia, en donde se observa una reducción de la energía (tanto en invierno como en verano) en comparación con el experimento de referencia (sin dispositivos CEO). En estas figuras, la línea vertical discontinua señala la frecuencia asociada al pico espectral, f_p , que corresponde a un valor de 0.0780 Hz en el caso de invierno y 0.1673 Hz en verano. En ambos casos la mayor reducción de energía se da entre 0.07 Hz y 0.2 Hz. Este rango de frecuencias coincide con el rango de mayor absorción de energía de la función $RCW(f)$ del dispositivo *Flap-Type* (ver Figura 12).

En el caso correspondiente al periodo de invierno, los resultados del Experimento 4 presentan un desplazamiento del pico del espectro de energía hacia las bajas frecuencias, que podría ser debido a disipación de la energía que se da principalmente en frecuencias altas. Por otro lado, en el caso de verano, el valor de f_p permanece aproximadamente igual en el Experimento 1 y 4 en comparación con el Experimento de referencia.

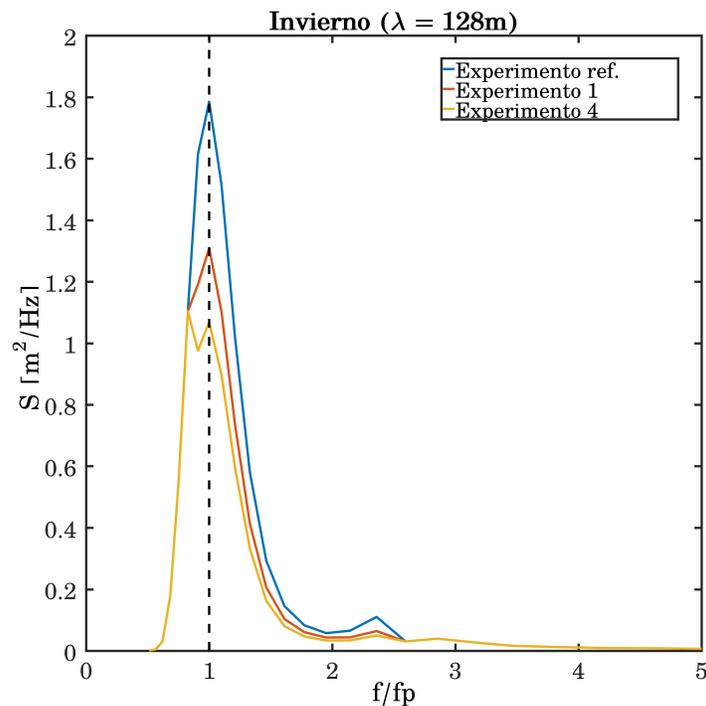


Figura 26. Resultados de espectros en función de la frecuencia obtenidos a partir de la simulación numérica en el caso del periodo invierno, a una distancia de $\lambda = 128$ m a sotavento de los CEO correspondientes al experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al experimento 1 y al experimento 4.

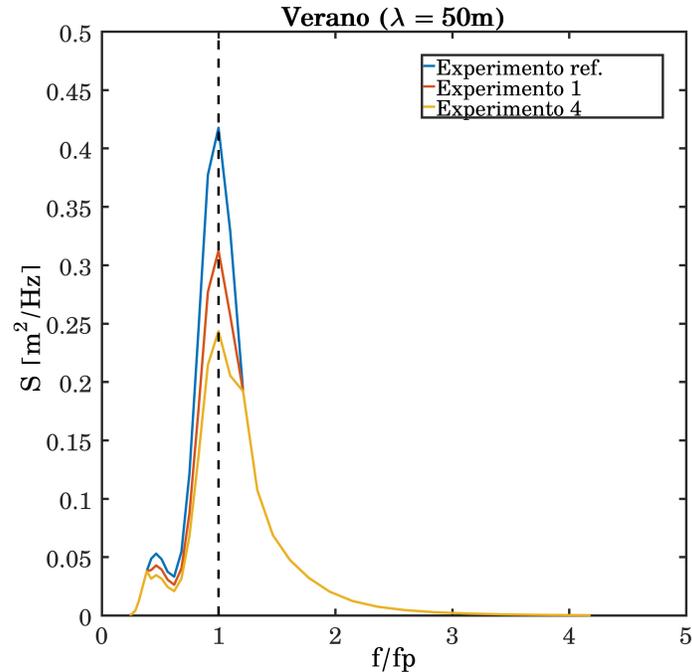


Figura 27. Resultados de espectros en función de la frecuencia obtenidos a partir de la simulación numérica en el caso del periodo verano, a una distancia de $\lambda = 50\text{m}$ a sotavento de los CEO correspondientes al experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al experimento 1 y al experimento 4.

Las Figuras 28 y 29 muestran los espectros en función de la frecuencia para los casos de invierno y verano, respectivamente, correspondientes al experimento de referencia (sin dispositivos CEO), y los experimentos 1 y 4. Los resultados que se muestran se obtuvieron en tres puntos con distancias a sotavento de los dispositivos CEO, iguales a $2\lambda = 256\text{ m}$, $4\lambda = 512\text{ m}$, y $8\lambda = 1024\text{ m}$ en el caso de invierno, y a $2\lambda = 100\text{ m}$, $4\lambda = 200\text{ m}$, y $8\lambda = 400\text{ m}$ en el caso de verano.

En las Tablas 4 y 5 se presentan los resultados de las diferencias en porcentaje correspondientes a la energía integrada en frecuencia, en las cuales se compara el Experimento de referencia con el Experimento 1 y 4. Se obtiene que en el Experimento 1, en una distancia 8λ la diferencia con el experimento de referencia es insignificante, alrededor del 2% para el caso de invierno y una diferencia del 1% para verano. En cambio en el Experimento 4, en una distancia de 8λ la diferencia se mantiene alrededor del 21% en el caso de invierno y del 17% en verano.

Los resultados anteriores afirman que cuando los arreglos de dispositivos CEO están más cerca de la costa, el campo de olas que se propaga a sotavento de los CEO presenta un mayor efecto de la zona de sombra y, además de acuerdo a O'Dea *et al.* (2018), existe mayor probabilidad de influir en los procesos

costeros como transporte de sedimentos debido a que los cambios en F_y son mayores.

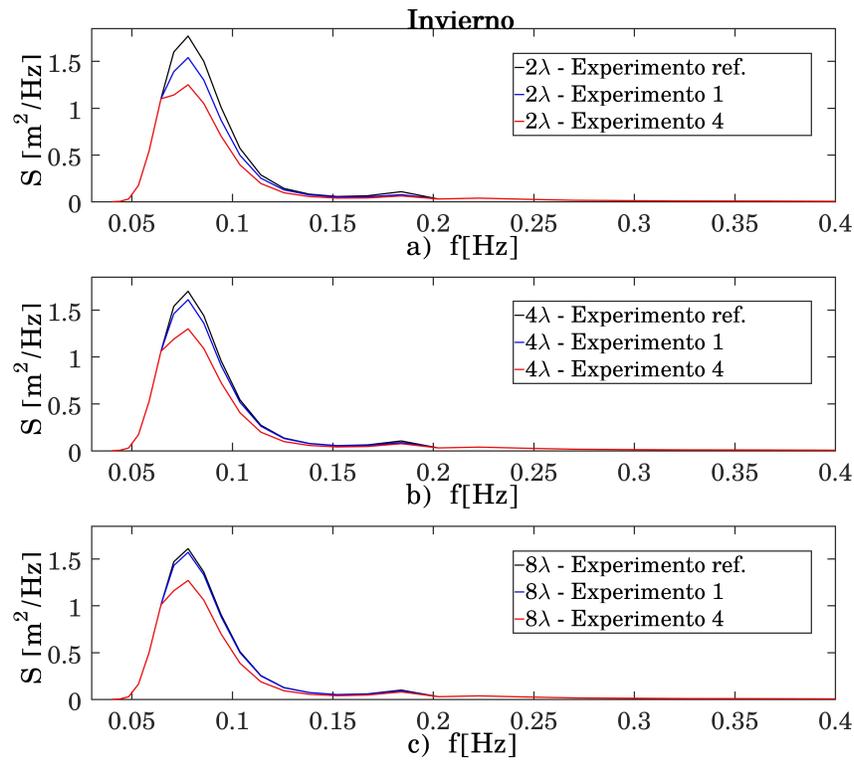


Figura 28. Resultados de los espectros de la densidad de energía en función de la frecuencia correspondientes al caso de invierno. Estos pertenecen al Experimento de referencia (sin dispositivos CEO), al Experimento 1 y al Experimento 4 a distancias de a) $2\lambda = 256\text{m}$, b) $4\lambda = 512\text{m}$, y c) $8\lambda = 1024\text{m}$, respectivamente.

Tabla 4. Valores de la diferencia de la energía en porcentaje, para el caso de invierno en tres distancias a sotavento de los dispositivos CEO, las cuales son: a) $2\lambda = 256\text{m}$, b) $4\lambda = 512\text{m}$, y c) $8\lambda = 1024\text{m}$.

Invierno			
	2λ	4λ	8λ
Experimento 1	12.25 %	4.75 %	2.05 %
Experimento 4	32.43 %	25.19 %	21.76 %

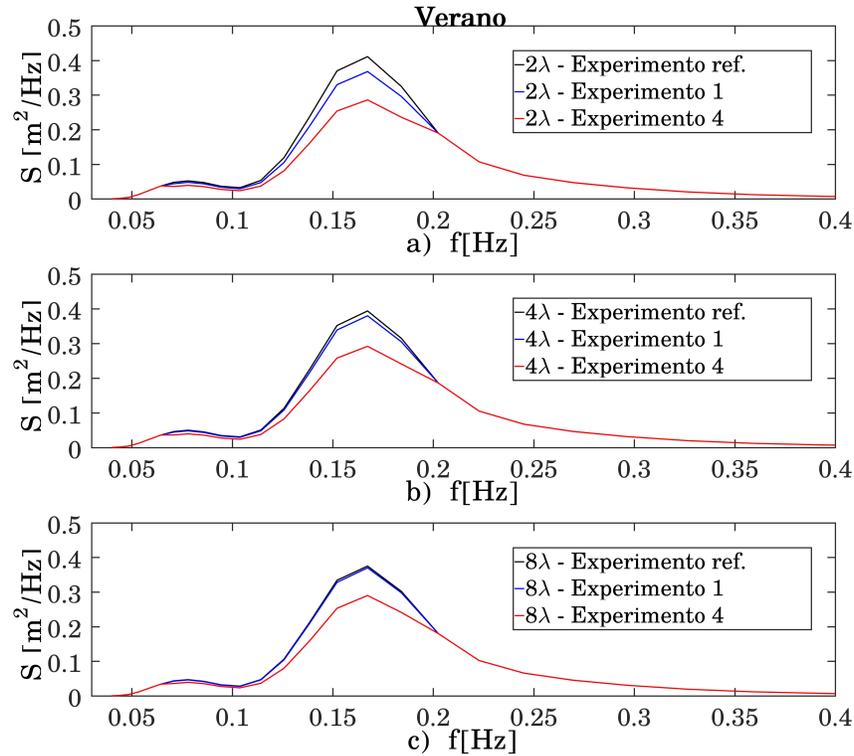


Figura 29. Resultados de los espectros de la densidad de energía en función de la frecuencia correspondientes al caso de verano. Estos pertenecen al Experimento de referencia (sin dispositivos CEO), el Experimento 1 y el Experimento 4 a distancias de a) $2\lambda = 100\text{m}$, b) $4\lambda = 200\text{m}$, y c) $8\lambda = 400\text{m}$.

Tabla 5. Valores de la diferencia de la energía en porcentaje, para el caso de verano en tres distancias a sotavento de los dispositivos CEO, las cuales son: a) $2\lambda = 100\text{m}$, b) $4\lambda = 200\text{m}$, y c) $8\lambda = 400\text{m}$.

Verano			
	2λ	4λ	8λ
Experimento 1	7.41 %	2.56 %	1.01 %
Experimento 4	25.16 %	20.82 %	17.43 %

El análisis del término fuente asociado con la disipación de energía del oleaje (S_{ds}) bajo la presencia de dispositivos CEO, se realizó mediante la comparación del experimento de referencia, con los experimentos 1 y 4, en el punto mostrado en la Figura 25. En las Figuras 30 y 31 se muestran los resultados de la disipación de energía por fricción con el fondo $S_{ds,fr}$, correspondientes al periodo de simulación de invierno y verano, respectivamente. Los resultados demuestran que bajo la presencia de dispositivos CEO se presenta una reducción de la magnitud del término $S_{ds,fr}$, debido a que en el punto de análisis, en los casos del experimento 1 y 4, hay menos energía disponible (porque los CEO absorbieron parte de la energía) que podría ser potencialmente disipada por la fricción con el fondo. Las diferencias entre la forma

de $S_{ds,fr}$ en los casos de invierno y de verano son debidas a la forma del espectro incidente característico en cada caso, es decir, en el verano se presenta un espectro principalmente bimodal, mientras que en el invierno el espectro es unimodal.

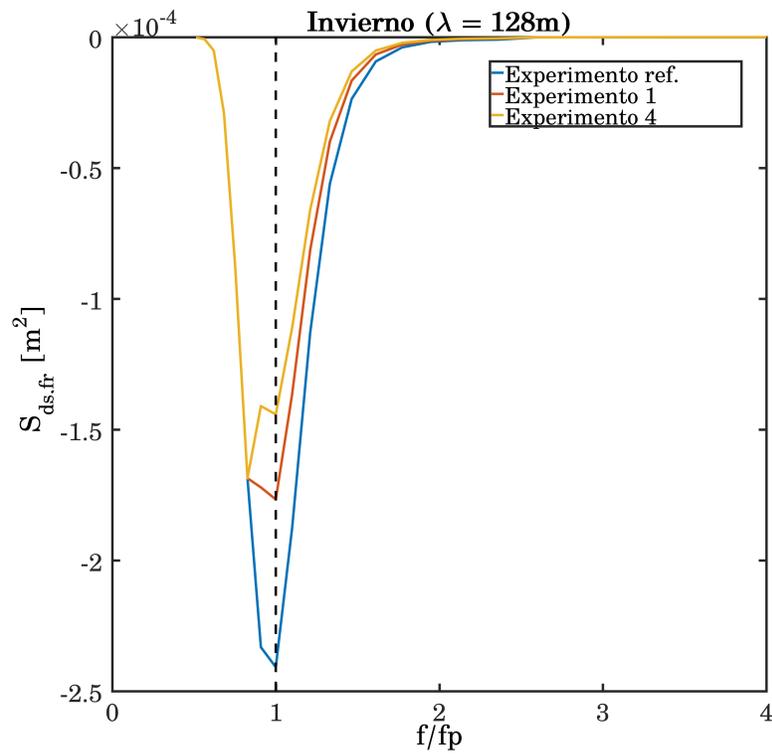


Figura 30. Resultados de la simulación numérica del caso de invierno correspondientes a $S_{ds,fr}$, para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4 en el punto de análisis.

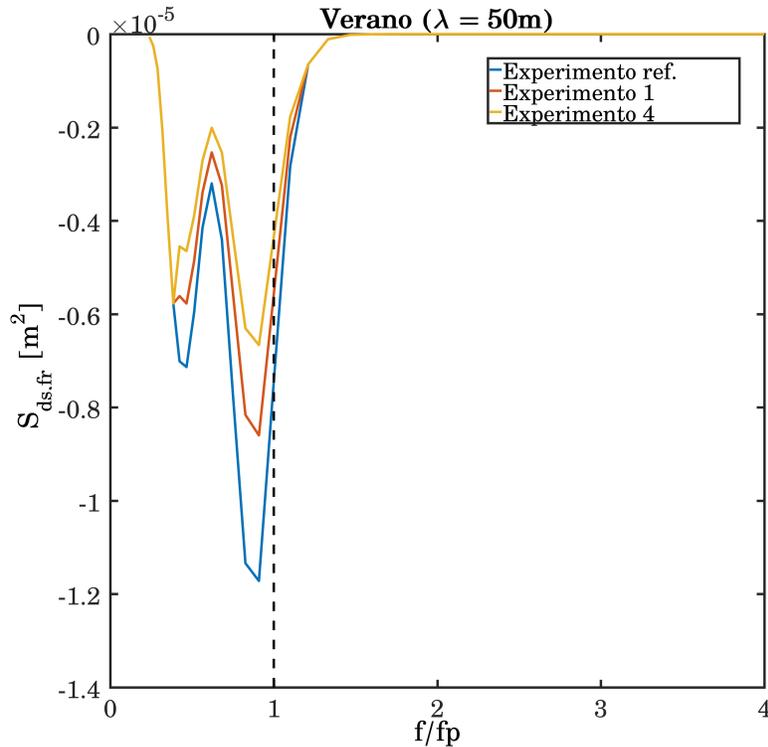


Figura 31. Resultados de la simulación numérica del caso de verano correspondientes a $S_{ds,fr}$, para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4 en el punto de análisis.

Con la finalidad de mostrar la reducción de $S_{ds,fr}$ al comparar los experimentos 1 y 4 con el experimento de referencia, en la Tabla 6 se muestran los resultados de integrar $S_{ds,fr}$ en la frecuencia y la dirección, calculados de acuerdo con:

$$s_{ds,fr} = \rho g \int \int S_{ds,fr}(f, \theta) df d\theta, \quad (42)$$

donde ρ es la densidad del agua y g es la aceleración de la gravedad.

Con los resultados de $s_{ds,f}$ se confirma que la presencia de dispositivos CEO induce una reducción en la disipación de energía por la fricción con el fondo hasta -33% en invierno y -37% en verano. La morfología del suelo marino y la hidrodinámica de la capa límite inferior están directamente relacionadas con la energía del oleaje que es disipada por la fricción con el fondo (Alexandre *et al.*, 2009). Por lo tanto, los resultados presentados implican que posiblemente habría una modificación de los procesos que determinan la hidrodinámica de la capa límite del fondo por la presencia de los dispositivos CEO.

Tabla 6. Resultados de la integral de $S_{ds,fr}(f)$ para los experimentos 1 y 4 y el experimento de referencia en los casos de invierno y verano. Donde $\Delta[\%]$ indica el porcentaje de la diferencia entre el experimento de referencia y los experimentos 1 y 4.

$s_{ds,fr} \text{ [J/m}^2\text{s]}$		
	Invierno	Verano
Experimento de referencia	-877	-104
Experimento 1	-685	-81
$\Delta[\%]$	-22 %	-23 %
Experimento 4	-588	-65
$\Delta[\%]$	-33 %	-37 %

De la misma manera, en las Figuras 32 y 33 se presentan los resultados del término fuente asociado con la disipación de la energía de las olas por rompimiento en aguas profundas (*white-capping*), $S_{ds,wc}(f)$ en función de la frecuencia, obtenidos a partir de las simulaciones numéricas en los casos de invierno y de verano, respectivamente. En los casos dispositivos CEO (experimentos 1 y 4), se obtuvo una significativa reducción de la disipación de energía por *white-capping* $S_{ds,wc}$, en comparación con el experimento de referencia. Es importante notar, que en los resultados de todos los experimentos se observa que el mínimo de $S_{ds,wc}$ ocurre cuando $f/f_p > 1$, lo cual es debido a que la máxima disipación por *white-capping* está asociada con en el máximo de la pendiente de la ola (Γ , ecuación 9), lo cual no necesariamente coincide con el pico del espectro.

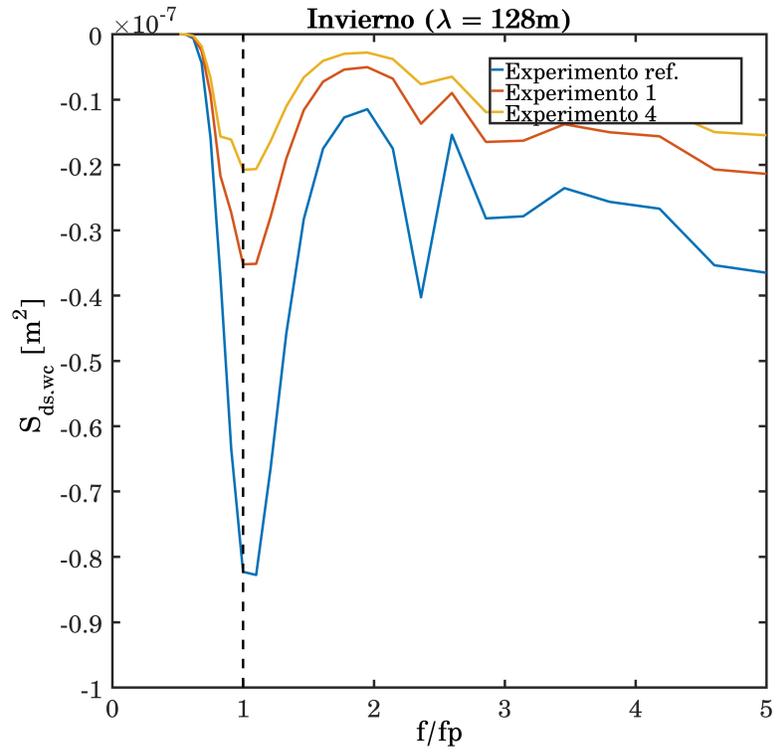


Figura 32. Resultados de $S_{ds,wc}$ en el punto de análisis obtenidos del caso de invierno correspondientes a los Experimentos 1 y 4 y para el Experimento de referencia.

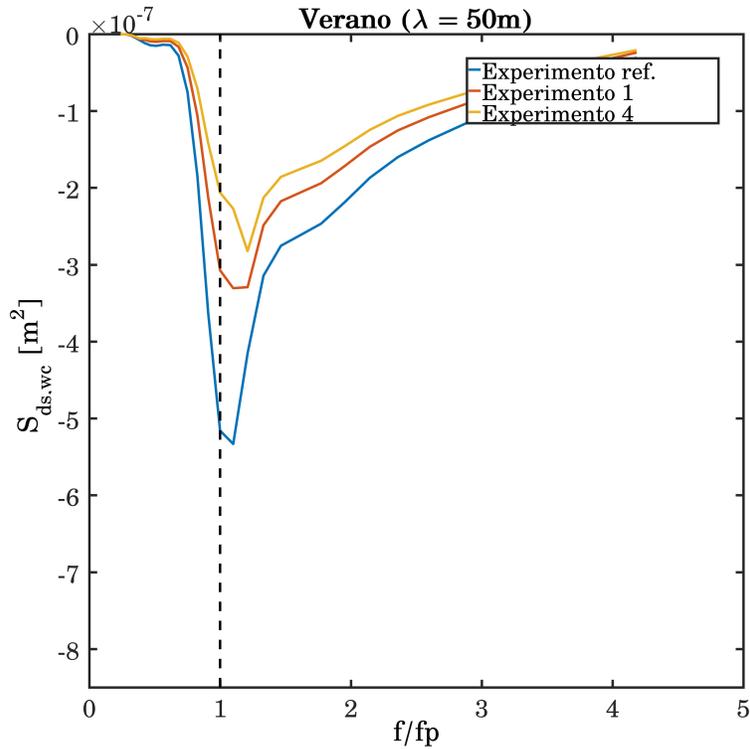


Figura 33. Resultados de $S_{ds,wc}$ en el punto de análisis obtenidos del caso de verano correspondientes a los Experimentos 1 y 4 y para el Experimento de referencia.

A partir de los resultados obtenidos de la disipación de energía por *white-capping*, se calculó el flujo de momentum por unidad de superficie que es transferido del campo de olas al océano, τ_c , como:

$$\tau_c = \rho g \int \int \frac{S_{ds,wc}(f, \theta)}{c} df d\theta, \quad (43)$$

donde ρ es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y c es la rapidez de fase, dada por,

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd}, \quad (44)$$

donde k es el número de onda y d es la profundidad. Este flujo de momentum es una de las variables más importantes en la dinámica de la capa límite superficial del océano, ya que determina en gran parte el perfil de la energía cinética turbulenta y la profundidad de la capa de mezcla (Peláez-Zapata, 2018; Rasche *et al.*, 2006). En la Tabla 7 se muestran los resultados de τ_c correspondientes al caso de invierno

y verano. Se obtiene que la presencia de dispositivos CEO generan que τ_c sea menor en comparación con el Experimento de referencia (sin dispositivos CEO), con valores de hasta -59% en el caso de invierno y -37% en verano. Lo anterior implica que la incorporación de los dispositivos CEO podría provocar una reducción de la inyección de la energía cinética turbulenta a la columna de agua debido a las olas.

Tabla 7. Resultados de las simulaciones numéricas de los periodos de invierno y verano correspondientes al flujo de momento por unidad de superficie, τ_c , para el Experimento de referencia, el Experimento 1 y el Experimento 4. Donde $\Delta\%$ indica el porcentaje de la diferencia entre el experimento de referencia y los experimentos 1 y 4.

τ_c [N/m ²]		
	Invierno	Verano
Experimento de referencia	-4.57×10^{-5}	-2.14×10^{-4}
Experimento 1	-2.59×10^{-5}	-1.62×10^{-4}
$\Delta\%$	-43%	-24%
Experimento 4	-1.85×10^{-5}	-1.35×10^{-4}
$\Delta\%$	-59%	-37%

3.6. Efecto en la potencia del oleaje

El análisis del efecto de los dispositivos CEO en la potencia del oleaje consistió en el cálculo de la potencia absorbida por los CEO *Flap-Type* estimada a partir de los espectros direccionales. La potencia se define como la transferencia de energía sobre una distancia determinada en la dirección de propagación del oleaje, y representa un flujo de energía (Bhattacharyya y McCormick, 2003). La forma integral de estimar la potencia esta dada de acuerdo a,

$$P = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} C_g(k, h) S(f, \theta) df d\theta, \quad (45)$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, C_g es la velocidad de grupo en función del número de onda profundidad (ecuación (28)) y $S(f, \theta)$ es el espectro de la densidad de energía del oleaje en función de la frecuencia y dirección.

En la Figura 34 se muestran los resultados de la potencia, P , correspondiente al punto de análisis (Figura 25) obtenidos a partir de las simulaciones numéricas correspondientes al año 2015. En esta figura se muestran los valores de la potencia promedio (P_{mean}), la potencia máxima (P_{max}) y la potencia mínima (P_{min}), que pueden considerarse como disponible en el oleaje prevaleciente y que podrían absorber los

dispositivos CEO *Flap-Type*.

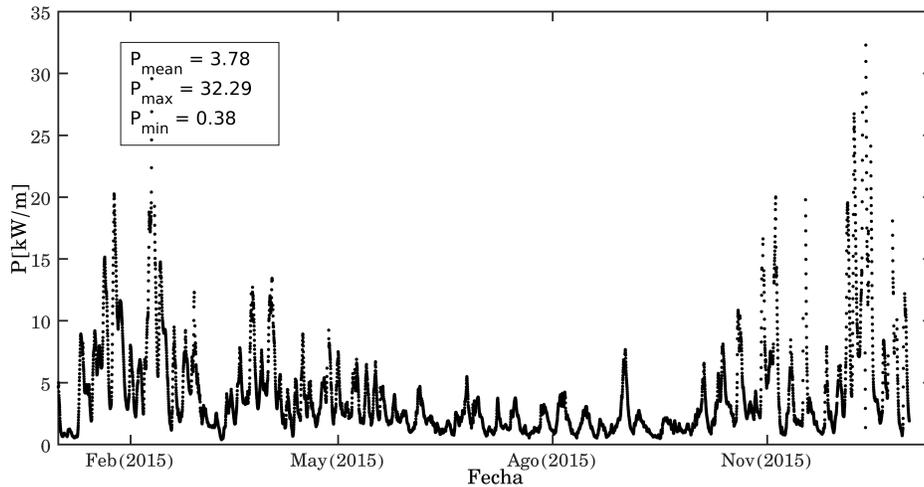


Figura 34. Resultados de la potencia $P[kW/m]$, obtenida a partir de la ecuación (45) en el punto de análisis, correspondiente a las simulaciones numéricas del año 2015.

En la mayoría de los casos de los dispositivos CEO, la extracción eficiente de la energía, depende de la dirección del oleaje incidente. Por ejemplo, algunos de los CEO patentados, particularmente los que son de un solo grado de libertad, están restringidos a absorber energía en ciertas bandas de frecuencias y en un rango de direcciones limitado (Aggidis y Taylor, 2017), el cual es el caso del dispositivo CEO *Flap-Type*. Por lo anterior se propone una función $RCW(f, \theta)$, considerando las características del movimiento de este dispositivo descritas en el capítulo 2.

La función $RCW(f, \theta)$ está dada por,

$$RCW(f, \theta) = RCW(f)D(\theta), \quad (46)$$

donde $D(\theta)$ es una función que representa la distribución de la capacidad del dispositivo CEO *Flap-Type* de absorber energía en ciertos rangos de direcciones. Basándose en las características del funcionamiento del dispositivo CEO *Flap-Type*, se propone la función $D(\theta)$, dada por,

$$D(\theta) = \cos(\theta - \theta_0)^{2m}, \quad (47)$$

donde θ es la dirección, θ_0 es el ángulo que define la orientación del dispositivo CEO, y m representa el ancho de la distribución direccional. Para los fines de este trabajo, se toma $\theta_0 = 180^\circ$ considerando que el dispositivo CEO *Flap-Type* permanece en una orientación fija con la cara externa de la aleta en dirección hacia el oeste. Se analizaron dos casos: cuando la dependencia de la capacidad de absorción de energía del dispositivo CEO *Flap-Type* con respecto a la dirección es relativamente baja ($m = 10$) y cuando es relativamente alta ($m = 2$).

En el inciso (a) de la Figura 35 se muestra la función $D(\theta)$ correspondiente al caso de $m = 10$, que representa la fracción del total de $RCW(f)$ de absorción de energía de los dispositivos CEO como función de la dirección θ . El inciso (b) de la Figura 35 muestra gráficamente la función $RCW(f, \theta)$, construida a partir de la multiplicación de $D(\theta)$ y $RCW(f)$, igualmente corresponde para el caso de $m = 10$. En este último inciso de la figura, se observa que la máxima absorción de energía por los dispositivos CEO, se alcanzaría cuando las olas se propagan de forma perpendicular a la pared del dispositivo con un ángulo de dirección predominante de $\theta = 0^\circ$ y/o $\theta = 180^\circ$, y en una banda de frecuencias entre 0.1 y 0.18 Hz.

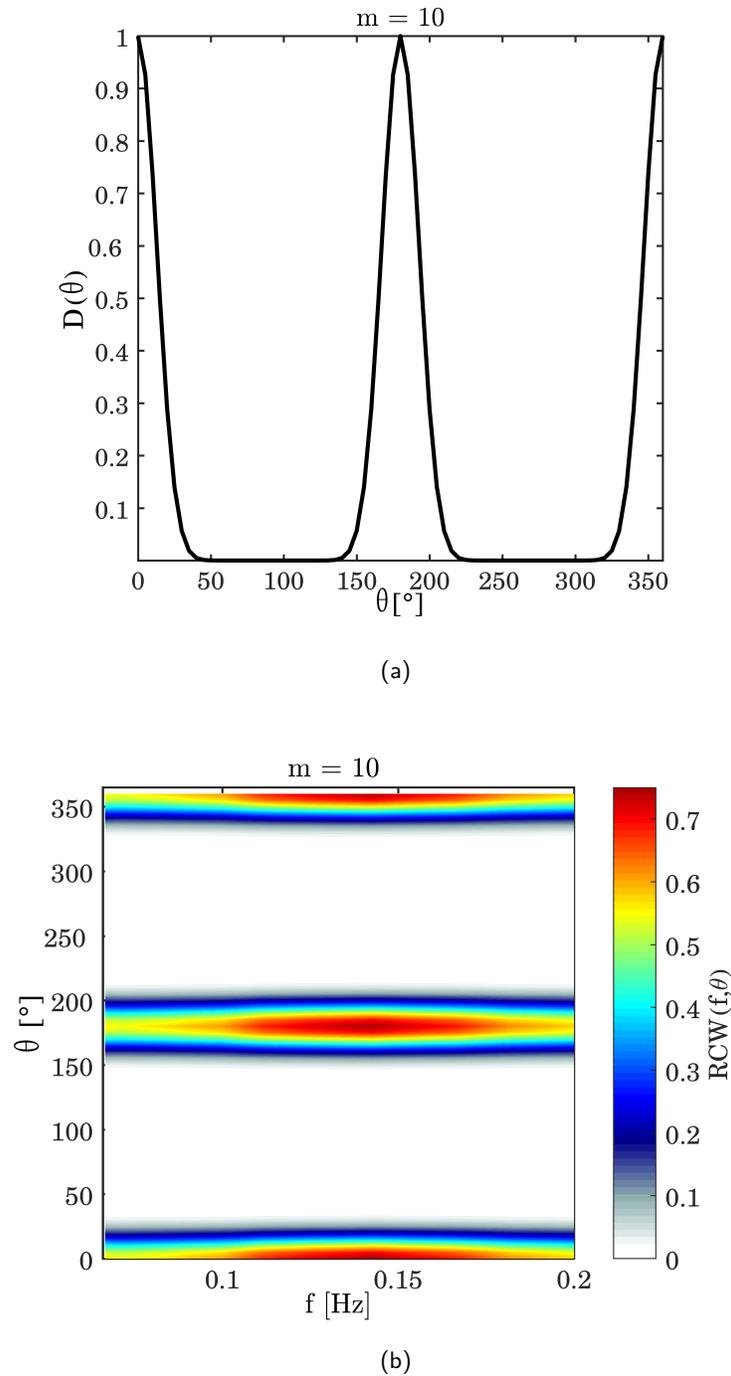


Figura 35. (a) Función $D(\theta) = \cos(\theta - \theta_0)^{2m}$ con $m = 10$, que indica la fracción del total de $RCW(f)$ de absorción de energía de los dispositivos CEO como función de la dirección. (b) Representación gráfica de $RCW(f, \theta)$ en función de la frecuencia y dirección para el CEO.

En la Figura 36 se muestra (a) la función $D(\theta)$ y (b) la función $RCW(f, \theta)$ para el caso de $m = 2$, respectivamente. Se observa que para $m = 2$, el dispositivo CEO *Flap-Type* puede absorber energía en un rango más amplio de direcciones.

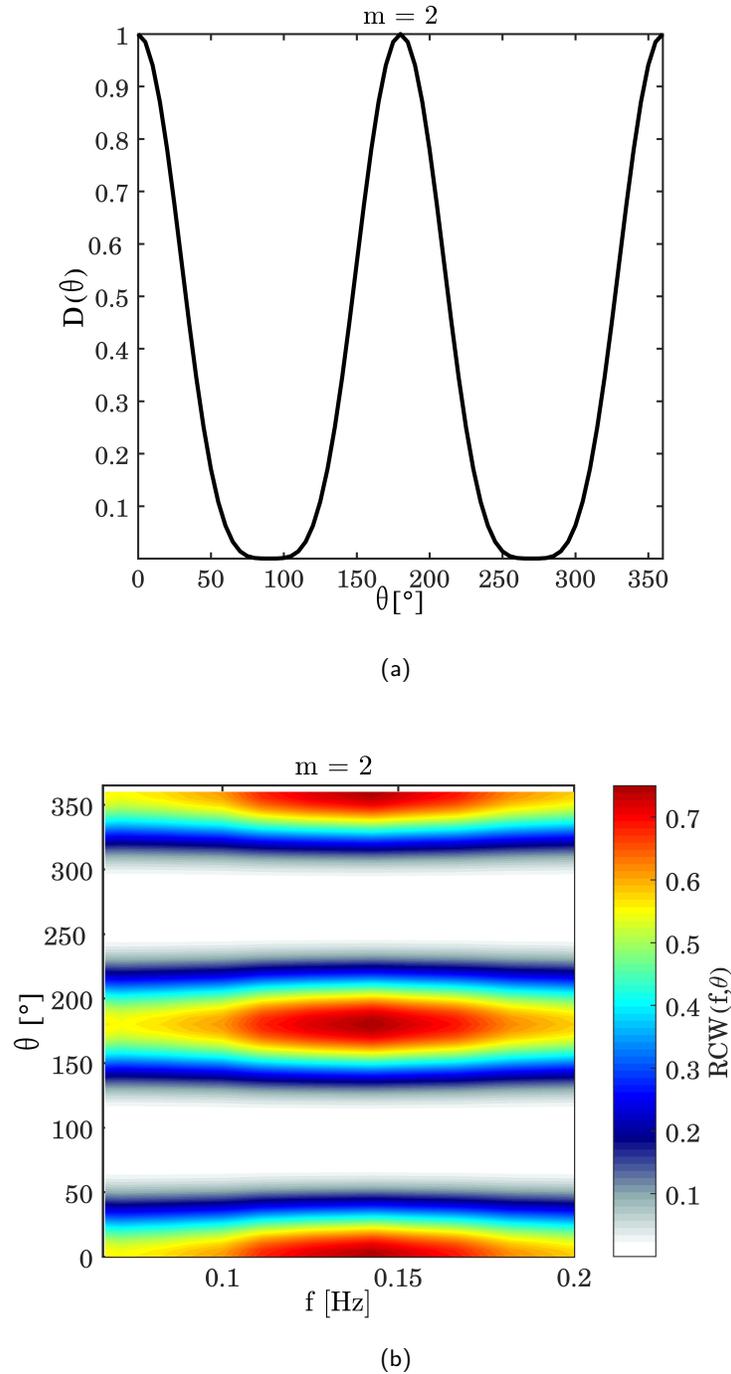


Figura 36. (a) Función $D(\theta) = \cos(\theta - \theta_0)^{2m}$ con $m = 2$, que indica la fracción del total de $RCW(f)$ de absorción de energía de los dispositivos CEO como función de la dirección. (b) Representación gráfica de $RCW(f, \theta)$ en función de la frecuencia y dirección para el CEO.

A partir de los espectros direccionales obtenidos de las simulaciones numéricas correspondientes al año 2015 en el punto de análisis, se estimó la potencia absorbida al considerar la función $RCW(f)$ (ver capítulo 2) que sólo depende de la frecuencia y de la función $RCW(f, \theta)$ que depende de la frecuencia y

la dirección, con la finalidad de comparar los resultados al utilizar las dos formulaciones. Lo anterior se realizó de acuerdo a las ecuaciones,

$$P_{abs.1} = RCW(f)P, \quad (48)$$

$$P_{abs.2} = RCW(f, \theta)P, \quad (49)$$

donde P es la potencia del oleaje de acuerdo con la ecuación (45).

En las Figuras 37 y 38 se muestran los resultados del caso de invierno y del caso de verano, respectivamente. En ambas figuras se muestra, (a) el espectro direccional del oleaje incidente, con el cual se calculó la, (b) potencia incidente del oleaje $P_{inc.}$. Se presenta también, (c) la potencia absorbida $P_{abs.1}$, donde su valor integrado se estima a partir de la ecuación (48). Finalmente se muestra, (d) la potencia absorbida $P_{abs.2}$ integrada de acuerdo a la ecuación (49).

A partir de la función $RCW(f, \theta)$ y utilizando $m = 10$, se observa que la absorción de la potencia del oleaje mostrada en el inciso (d) es mayormente restringida en la dirección, es decir, se muestra gráficamente que la potencia es absorbida en los rangos de dirección determinados por $RCW(f, \theta)$. Además, se muestra que para el caso de verano la potencia del oleaje incidente está distribuida en un rango más amplio de direcciones, por lo que la absorción de potencia está más restringida en dirección, mas adelante se dan resultados cuantitativos.

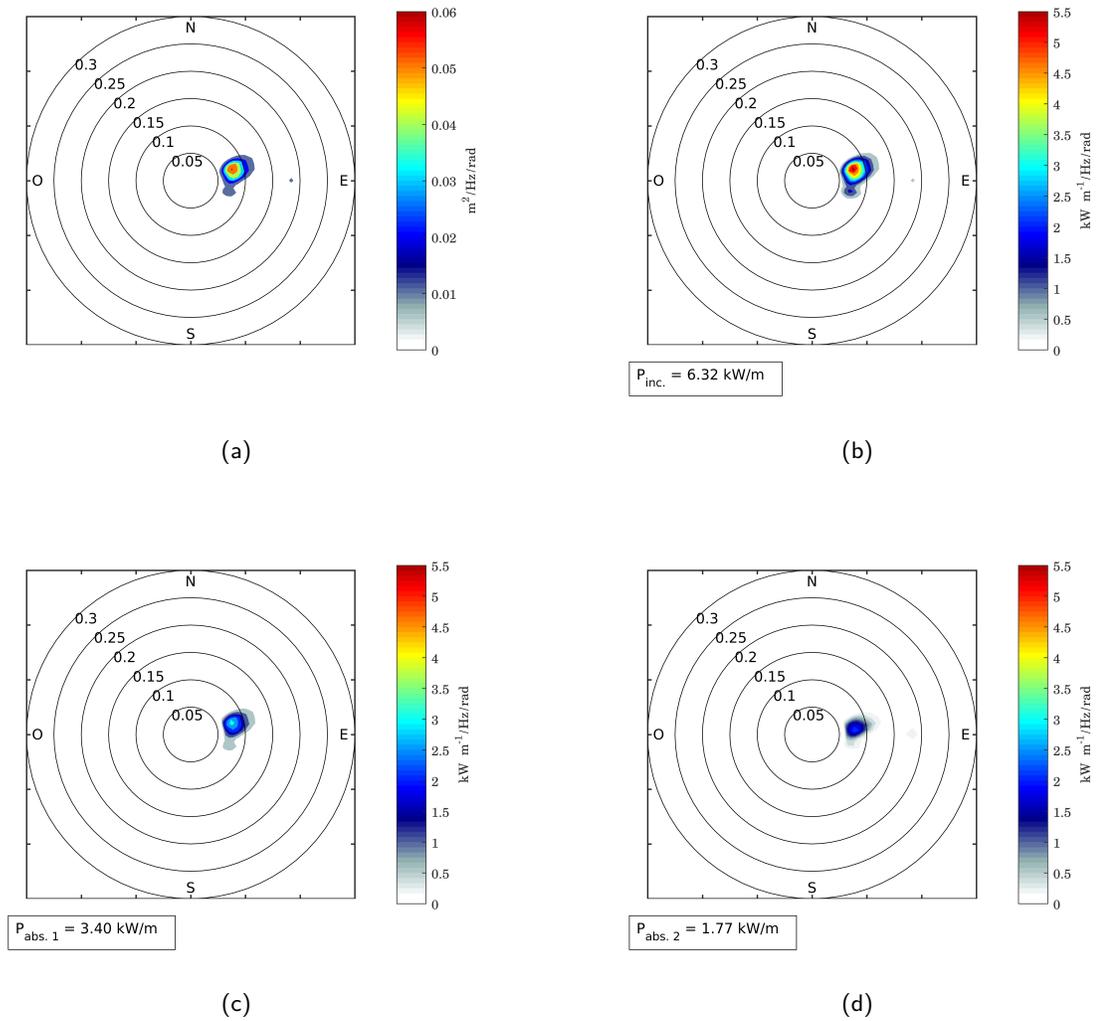


Figura 37. Resultados correspondientes al caso de invierno en el nodo de análisis. (a) Espectro direccional del oleaje incidente. (b) Potencia del oleaje incidente. (c) Potencia absorbida por el CEO *Flap-Type* estimada de la ecuación $P_{abs.1}$ (d) Potencia absorbida de acuerdo con la ecuación $P_{abs.2}$.

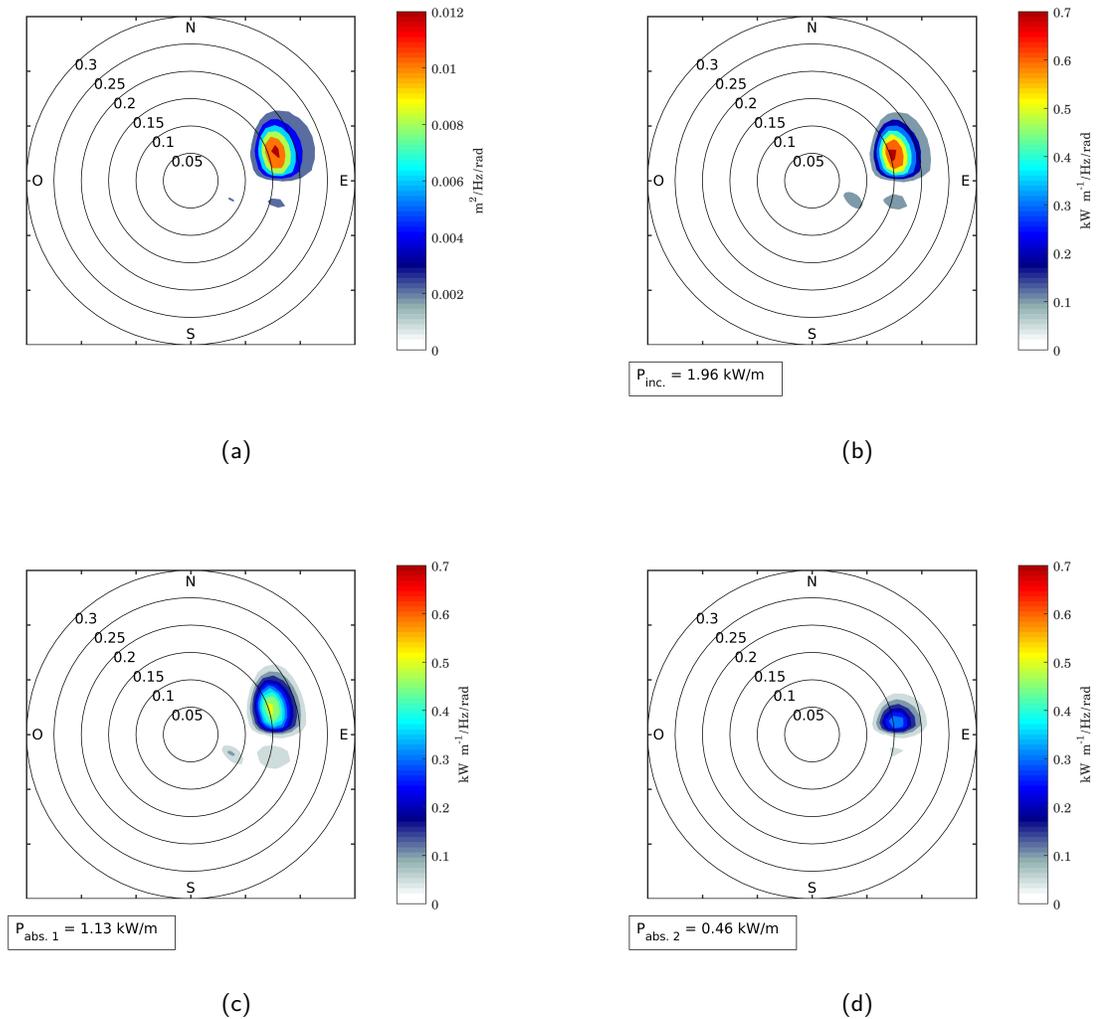


Figura 38. Resultados correspondientes al caso de verano en el nodo de análisis. (a) Espectro direccional del oleaje incidente. (b) Potencia del oleaje incidente. (c) Potencia absorbida por el CEO *Flap-Type* estimada de la ecuación $P_{abs.1}$ (d) Potencia absorbida de acuerdo con la ecuación $P_{abs.2}$.

Los resultados obtenidos de la estimación de la potencia absorbida $P_{abs.1}$ y $P_{abs.2}$ para los casos de invierno y verano se muestran en la Tabla 8. En esta tabla, se muestran las diferencias de los resultados al utilizar $m = 2$ y $m = 10$ y se obtiene que para $m = 10$ el CEO *Flap-Type* puede absorber hasta -60% menos al comparar $P_{abs.1}$ y $P_{abs.2}$. En cambio, al utilizar $m = 2$ la diferencia entre estimar $P_{abs.1}$ y $P_{abs.2}$ puede ser hasta del -22%. Los resultados anteriores son debidos a que al utilizar $m = 10$ para estimar $P_{abs.2}$ se considera que el dispositivo CEO *Flap-Type* tiene la capacidad de absorber energía en un rango estrecho de direcciones y, con $m = 2$ al calcular $P_{abs.2}$ el rango de direcciones para absorber energía es mas amplio. Estos resultados demuestran la importancia de considerar el rendimiento de los dispositivos CEO en dirección, puesto que la diferencia es significativa al estimar la potencia absorbida si se considera

que los dispositivos CEO pueden absorber de todas las direcciones o solo de un rango limitado.

Tabla 8. Estimación de la potencia absorbida de acuerdo con las formulaciones de $P_{abs.1}$ y $P_{abs.2}$ al utilizar $m = 2$ y $m = 10$ para los casos de invierno y verano.

m=10				
	P	$P_{abs.1}$	$P_{abs.2}$	Δ
Invierno	6.32[kW/m]	3.40[kW/m]	1.77[kW/m]	-48 %
Verano	1.96[kW/m]	1.13[kW/m]	0.46[kW/m]	-60 %
m=2				
	P	$P_{abs.1}$	$P_{abs.2}$	Δ %
Invierno	6.32[kW/m]	3.40[kW/m]	2.92[kW/m]	-14 %
Verano	1.96[kW/m]	1.13[kW/m]	0.88[kW/m]	-22 %

Adicionalmente, a partir de las simulaciones numéricas realizadas con los cuatro experimentos descritos en el capítulo 2 (ver Tabla 3), se calculó la potencia absorbida por cada uno de los dispositivos CEO *Flap-Type* en los puntos de malla donde éstos fueron localizados, mediante la función $RCW(f, \theta)$ para el caso de $m = 10$ y al considerar las dimensiones del CEO *Flap-Type*, como,

$$P_{abs} = RCW(f, \theta)P \cdot L, \quad (50)$$

donde $L = 26$ m es el ancho del CEO *Flap-Type* en el cual el dispositivo absorbe la energía del oleaje incidente.

En la Tabla 9 se muestran los resultados de la potencia absorbida total y la potencia absorbida por unidad de dispositivo CEO (P.abs.u.) en kW por hora, calculado de acuerdo a la ecuación (50), para el caso de verano y el caso de invierno. Los resultados de los experimentos 2, 3 y 4 muestran que la P.abs.u. se reduce cuando hay una mayor cantidad de dispositivos CEO. Lo anterior, es debido a que parte de la energía antes disponible ya fue absorbida por los otros CEO, y debido a que la presencia de dispositivos CEO modifican (al absorber energía) los espectros direccionales posteriores y el de los alrededores. Al comparar los resultados de los experimentos 3 y 4, se obtiene que la P.abs.u. es mayor para el caso del experimento 4, por lo cual este último arreglo es óptimo cuando se consideran mas de 5 dispositivos CEO.

Tabla 9. Potencia absorbida en kW·h y potencia absorbida por unidad de dispositivo CEO (P.abs.u.) estimados a partir de los cuatro experimentos diseñados (ver capítulo 2), correspondientes al periodo de las simulaciones de invierno y verano.

$P_{abs} [kW \cdot h]$				
	Invierno	P.abs.u.	Verano	P.abs.u.
experimento 1	92.56	92.56	30.16	30.16
experimento 2	454.22	90.84	149.76	29.95
experimento 3	849.94	84.99	284.44	28.44
experimento 4	2147	85.88	711.88	28.47

Capítulo 4. Conclusiones

En este trabajo se realizaron simulaciones numéricas con el modelo de tercera generación SWAN con la finalidad de analizar el efecto de los convertidores de energía del oleaje en el espectro direccional de las olas. El modelo se validó mediante comparaciones de observaciones de ADCP en tres sitios (ITS, PM, PH) durante los años 2015 y 2016. Los resultados de la validación demuestran que los parámetros integrales del oleaje H_s , T_p y T_{m01} se reproducen razonablemente bien con el modelo numérico, mientras que los parámetros Dir , F_{spr} y D_{spr} presentaron mayores diferencias con respecto a las observaciones, lo cual es atribuido a la resolución direccional del modelo, la resolución de la batimetría y la incertidumbre en las condiciones de frontera, ya que solo se consideró el forzamiento por la frontera oeste.

Los dispositivos CEO se representaron en el modelo mediante la función $RCW(f)$ correspondiente a un dispositivo *Flap-Type* para realizar las simulaciones numéricas bajo la presencia de estos. Se propusieron cuatro diseños de arreglos de dispositivos CEO *Flap-Type* con el propósito de evaluar el efecto de estos en el espectro direccional del oleaje, mediante diferentes experimentos. Se realizaron cinco experimentos diferentes: uno sin dispositivos CEO como escenario de referencia y cuatro más con configuraciones de uno, cinco, diez y veinticinco dispositivos, este último siguiendo un arreglo escalonado. Se concluye que al aumentar la cantidad de dispositivos CEO y al disminuir la distancia de estos hacia la costa, los efectos son relativamente mayores y se detallan a continuación. Se encontró que el arreglo óptimo para los casos de más de 5 dispositivos CEO, es el diseño tipo escalonado, ya que en este la potencia total absorbida entre el número de dispositivos es mayor.

La presencia de los dispositivos CEO genera una disminución de la energía en el campo de olas debido a que éstos son obstáculos que absorben parcialmente la energía del oleaje. Lo anterior se observa en los parámetros integrales del espectro direccional como una zona de sombra al comparar la diferencia entre los parámetros integrales del oleaje correspondientes al escenario de referencia y los demás experimentos. Se obtuvo una reducción de hasta 30% en la altura significativa en el caso de invierno y de 25% en el caso de verano, a una distancia de la ubicación de los dispositivos equivalente a una longitud de onda. A medida que las olas se acercan a la costa, se presenta una disminución de esta zona de sombra. Esto se debe al efecto de la dispersión direccional del oleaje que hace que la energía de las olas se propague en

un rango de direcciones alrededor de la dirección principal, lo que le da la forma característica a dicha zona de sombra. A partir de los resultados obtenidos se encontró que la presencia de dispositivos CEO genera cambios de alrededor de $\pm 2\%$ en la dirección promedio de propagación de la energía del oleaje y en el periodo asociado al pico espectral. Lo anterior implica que los CEO provocan redirección de la energía del oleaje y traslado de los picos energéticos.

Adicionalmente, se demostró que la presencia de dispositivos CEO genera cambios en las componentes F_x y F_y de la fuerza inducida por el oleaje, la cual, es la responsable de generar las corrientes a lo largo y hacia la costa, que a su vez pueden provocar transporte de sedimentos. Los resultados presentados en este trabajo sugieren que los cambios en esta variable son más notorios a sotavento de la ubicación de los dispositivos, particularmente a una distancia de una longitud de onda λ . Debido a la importancia de la fuerza inducida por el oleaje en la dinámica costera, es necesario realizar un análisis más detallado para determinar la influencia que tiene los dispositivos CEO en la zona de rompiente. Por otro lado, se puede concluir que los términos fuente de la disipación de energía del oleaje por *white-capping* ($S_{ds,wc}$) y por la fricción con el fondo ($S_{ds,fr}$) se reducen debido a la presencia de los dispositivos CEO. En el caso de la disipación por *white-capping* implica que haya una disminución del flujo de momentum de las olas al océano (τ_c) y por lo tanto un cambio en la estructura del perfil vertical de la energía cinética turbulenta en la columna de agua. Se observó una mayor reducción de τ_c en el experimento con el arreglo de veinticinco dispositivos CEO, obteniéndose una diferencia de hasta el -36% en comparación con los demás experimentos.

Literatura citada

- Aggidis, G. y Taylor, C. (2017). Overview of wave energy converter devices and the development of a new multi-axis laboratory prototype. *IFAC-PapersOnLine*, **50**(1): 15651–15656.
- Alexandre, A., Stallard, T., y Stansby, P. (2009). Transformation of wave spectra across a line of wave devices. En: *8th European Wave and Tidal Energy Conference*, 9.
- Atan, R., Finnegan, W., Nash, S., y Goggins, J. (2019). The effect of arrays of wave energy converters on the nearshore wave climate. *Ocean Engineering*, **172**: 373–384.
- Babarit, A. (2013). On the park effect in arrays of oscillating wave energy converters. *Renewable Energy*, **58**: 68–78.
- Battjes, J. y Van Vledder, G. P. (1984). Verification of kimura's theory for wave group statistics. *Coastal Engineering Proceedings*, **1**(19).
- Battjes, J. A. y Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. En: *Coastal Engineering 1978*, aug. American Society of Civil Engineers.
- Beels, C., Troch, P., Visch, K. D., Kofoed, J. P., y Backer, G. D. (2010). Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of wave dragon wave energy converters. *Renewable Energy*, **35**(8): 1644–1661.
- Bhattacharyya, R. y McCormick, M. (2003). Introduction. En: *Wave Energy Conversion*. Elsevier, pp. 1–6.
- Booij, N., Ris, R. C., y Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **104**(C4): 7649–7666.
- Budar, K. y Falnes, J. (1975). A resonant point absorber of ocean-wave power. *Nature*, **256**(5517): 478–479.
- Cavaleri, L. y Malanotte-Rizzoli, P. (1981). Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications. *Journal of Geophysical Research*, **86**(C11): 10961.
- Chang, G., Ruehl, K., Jones, C., Roberts, J., y Chartrand, C. (2016). Numerical modeling of the effects of wave energy converter characteristics on nearshore wave conditions. *Renewable Energy*, **89**: 636–648.
- Collins, J. I. (1972). Prediction of shallow-water spectra. *Journal of Geophysical Research*, **77**(15): 2693–2707.
- Drew, B., Plummer, A. R., y Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **223**(8): 887–902.
- Díaz, T. I. J. (2015). *Evolución del espectro direccional del oleaje en presencia de corrientes intensas*. Tesis de maestría, CICESE.
- Falcão, A. F. d. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**(3): 899–918.
- Falnes, J. (2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, **20**(4): 185–201.

- Gordon, L. y Lohrmann, A. (2002). Near-shore doppler current meter wave spectra. En: *Ocean Wave Measurement and Analysis (2001)*, mar. American Society of Civil Engineers.
- Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, **6**(1-2): 107–127.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., *et al.* (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). *Ergänzungsheft 8-12*.
- Hasselmann, S. y Hasselmann, K. (1985). Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part i: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral. *Journal of Physical Oceanography*, **15**(11): 1369–1377.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- Kuik, A. J., van Vledder, G. P., y Holthuijsen, L. H. (1988). A method for the routine analysis of pitch-and-roll buoy wave data. *Journal of Physical Oceanography*, **18**(7): 1020–1034.
- Madsen, O. S., Poon, Y.-K., y Graber, H. C. (1988). Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory. *Coastal Engineering Proceedings*, **1**(21).
- Mastenbroek, C., Burgers, G., y Janssen, P. (1993). The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer. *Journal of physical Oceanography*, **23**(8): 1856–1866.
- Melikoglu, M. (2018). Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, **148**: 563–573.
- Newman, J. N. (1975). Interaction of waves with two-dimensional obstacles: a relation between the radiation and scattering problems. *Journal of Fluid Mechanics*, **71**(2): 273–282.
- O'Dea, A., Haller, M. C., y Özkan Haller, H. T. (2018). The impact of wave energy converter arrays on wave-induced forcing in the surf zone. *Ocean Engineering*, **161**: 322–336.
- Peláez-Zapata, D. S. (2018). *Efecto del oleaje en la capa límite superficial del océano*. Tesis de maestría, CICESE.
- Phillips, O. M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*, **2**(05): 417.
- Raschle, N., Ardhuin, F., y Terray, E. A. (2006). Drift and mixing under the ocean surface: A coherent one-dimensional description with application to unstratified conditions. *Journal of Geophysical Research*, **111**(C3).
- Renzi, E., Doherty, K., Henry, A., y Dias, F. (2014). How does oyster work? the simple interpretation of oyster mathematics. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, **47**: 124–131.
- Sarkar, D., Dias, F., y Renzi, E. (2014). Wave farm modelling of oscillating wave surge converters. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **470**(2167): 20140118–20140118.
- Saulnier, J.-B., Clément, A., de O. Falcão, A. F., Pontes, T., Prevosto, M., y Ricci, P. (2011). Wave groupiness and spectral bandwidth as relevant parameters for the performance assessment of wave energy converters. *Ocean Engineering*, **38**(1): 130–147.

- The SWAN manual version 41.20AB (2019). Swan scientific and technical documentation. *O*, **104**(0): 0.
- The WAMDI Group (1988). The WAM model—a third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, **18**(12): 1775–1810.
- Troch, P., Beels, C., Rouck, J. D., y Backer, G. D. (2011). Wake effects behind a farm of wave energy converters for irregular long-crested and short-crested waves. *Coastal Engineering Proceedings*, **1**(32): 53.
- Veigas, M., Ramos, V., y Iglesias, G. (2014). A wave farm for an island: Detailed effects on the nearshore wave climate. *Energy*, **69**: 801–812.
- Whittaker, T. y Folley, M. (2011). Nearshore oscillating wave surge converters and the development of oyster. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **370**(1959): 345–364.
- Yang, Z., Neary, V. S., Wang, T., Gunawan, B., Dallman, A. R., y Wu, W.-C. (2017). A wave model test bed study for wave energy resource characterization. *Renewable Energy*, **114**: 132–144.