

**INFORME DE CALIBRACIÓN FINAL PLURIANUAL DE LOS DATOS DE
OLEAJE DE LA NOAA CON DATOS MEDIDOS EN SITIO**

LICITACIÓN ABREVIADA 2018LA-000017-0012400001

**Consultoría para la medición y calibración del oleaje reportado por la
NOAA para el Golfo de Nicoya**

Realizado por: iMARES-INII-UCR

Para: Dirección de Obras Marítimo Portuarias, DMP-MOPT

Noviembre 2022



INFORME DE CALIBRACIÓN



Tabla de contenido

1. JUSTIFICACIÓN.....	4
2. ALCANCE.....	4
3. INTRODUCCIÓN	5
4. OBJETIVO	6
5. DATOS INSTRUMENTALES	6
5.1. Equipo de medición.....	6
6. BASES DE DATOS DE REANÁLISIS.....	11
6.1. Reanálisis del oleaje de la NOAA.....	11
6.2. Reanálisis del oleaje del CMEMS.....	14
7. METODOLOGÍA.....	16
7.1. Metodología de traslado de información.....	16
7.2. Metodología de calibración.....	20
8. RESULTADOS.....	21
8.1. Traslado de información instrumental en aguas profundas	21
8.2. Calibración datos de la NOAA	24
8.3. Calibración datos del CMEMS	27
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	30
9.1. Conclusiones.....	30
9.2. Recomendaciones	31
10. REFERENCIAS	32



1. JUSTIFICACIÓN

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) promovió la Licitación Abreviada 2018LA-000017-0012400001 denominada “Consultoría para la medición y calibración del oleaje reportado por la NOAA para el Golfo de Nicoya”. La Proveeduría institucional del MOPT manifiesta que la licitación antes mencionada se adjudica a la Fundación UCR.

Fundación UCR realiza por medio de la Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y Estuarios (IMARES) los trabajos según los términos solicitados en el Cartel de Licitación.

2. ALCANCE

Calibrar los datos de oleaje pronosticados por la NOAA mediante el modelo numérico Wavewatch 3 (WW3). Para cumplir con el trabajo encomendado se recurre a los datos instrumentales medidos por un perfilador de corriente acústico y medidor de oleaje multidireccional tipo AST (Acoustic Surface Tracking), durante el periodo del 18 de junio del 2015 al 02 de noviembre del 2022 en Cabo Blanco (extensión temporal que coincide con la base de datos de reanálisis).

Los datos instrumentales se trasladan hasta el sitio donde se tiene la información numérica (bases de datos de reanálisis), mediante técnicas de regionalización híbrida, para luego, una vez que exista coincidencia temporal y espacial, aplicar técnicas matemáticas de calibración.

Este documento ha sido elaborado por los miembros de la Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios:

- **Ing. Javier Zumbado González.**
- **Ing. Henry Alfaro Chavarría, Ph. D.**

La supervisión de este estudio ha sido efectuada por los profesionales de la Dirección de Infraestructura de la División Marítimo Portuaria del Ministerio de Obras Públicas y Transportes:

- **Ing. Diego Leal Obando, Dirección de Infraestructura**


Fdo: Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph. D., Coordinador, IMARES.



3. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de campo de variables como el oleaje son comúnmente empleadas como parte de la caracterización del clima marítimo en una localización concreta, sin embargo, su carácter puntual y generalmente de corta duración hace que su aplicación se vea limitada para contar con un carácter estadístico del clima de oleaje adecuado y suficiente para su posterior explotación en cualquier proyecto de obra costera o portuaria.

Las bases de datos de oleaje obtenidas mediante técnicas de aproximación numérica (reanálisis), han cobrado especial protagonismo a lo largo de las dos últimas décadas. Estas bases de datos consisten en series continuas, homogéneas espacial y temporalmente, que pueden llegar a aportar datos históricos horarios.

Sin embargo, estas bases de datos no suelen abarcar las zonas costeras o litorales y a pesar de las mejoras en las herramientas numéricas, en cuanto a sus esquemas de resolución de ecuaciones y la incorporación de más variables, que procuran reproducir los procesos físicos de la naturaleza, siempre se hace necesario recurrir a información instrumental, ya sea para validar y/o calibrar las bases de datos de reanálisis de oleaje.

En el presente informe se describe el equipo utilizado para medir la variable del oleaje, la ubicación geográfica donde estuvo emplazado, la configuración de éste y los parámetros medidos. Asimismo, se describe la metodología aplicada para trasladar los datos medidos hasta el sitio donde se tiene la información de reanálisis de oleaje.

Luego, se describen las dos bases de datos de reanálisis de oleaje que se han calibrado, las cuales son: *Production Hindcast* de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés), generada a partir del modelo Wavewatch 3 (WW3) y WEVERYS del Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, por sus siglas en inglés), generada a partir del modelo MFWAM. Este último reanálisis se incorpora como una información adicional a lo requerido según los términos de referencia del cartel de licitación.

Seguidamente se dedica un apartado para detallar el procedimiento empleado para calibrar los datos de la NOAA y CMEMS, además de las técnicas matemáticas utilizadas para realizar la calibración. Por último, se incluye un apartado de recomendaciones y otro con las conclusiones más importantes acerca del trabajo realizado.

4. OBJETIVO

Calibrar el parámetro de altura de ola calculado por los reanálisis de la NOAA y CMEMS en un nodo virtual frente a la entrada al Golfo de Nicoya, utilizando datos recolectados por un instrumento colocado en Cabo Blanco.

5. DATOS INSTRUMENTALES

5.1. Equipo de medición

Para realizar las mediciones del oleaje se utiliza un equipo perfilador de corrientes y medidor de oleaje multidireccional tipo AST (Acoustic Surface Tracking), denominado AWAC de la marca Nortek, el cual puede medir las velocidades y las direcciones de las corrientes en capas de un metro, así como olas de todo tipo. Este equipo basa su medición de altura de ola por medio de una detección acústica de la superficie del mar mediante un transductor vertical (Haz acústico en posición vertical). La Figura 1 muestra el equipo AWAC en la parte superior y el cilindro donde se colocan las baterías en la parte inferior, ambos dispositivos colocados en una base fijada al fondo marino.

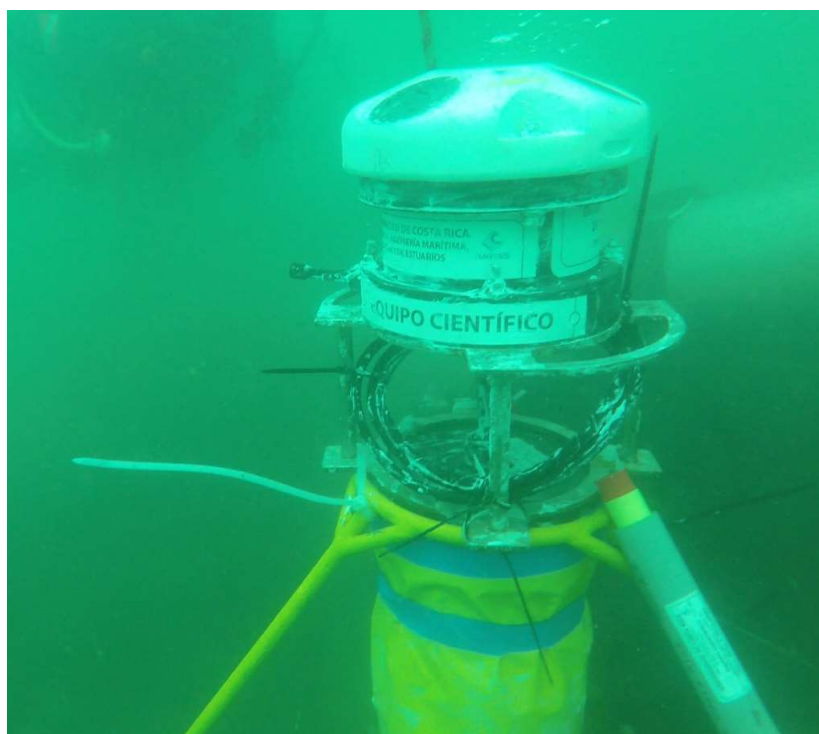


Figura 1. AWAC instalado en Cabo Blanco

Una característica singular de este equipo es la posibilidad de medir directamente parámetros de oleaje como H_{\max} y $H_{1/10}$, entre otras. La precisión al medir la altura de ola es del centímetro y para el período es de medio segundo. El AWAC es un equipo sólido de 6,1 kg, cuya configuración física es de cuatro haces acústicos, uno vertical y los otros tres en un ángulo de 45°. Además, puede medir hasta una profundidad de 35 metros, utiliza baterías alcalinas de 9-18 V, donde la duración depende de configuración elegida y la cantidad de datos registrados. La memoria del equipo cuenta con una capacidad de 2 MB, siendo capaz de registrar todos los datos a lo largo de la vida útil de la batería. En cuanto a su configuración de lectura de datos, se ha programado con una frecuencia de muestreo a 2 Hz para que registre un total de 2048 datos, lo que equivale a un período de medición de aproximadamente 17 minutos representativos de cada 3 h.

La ubicación del equipo, así como los dos nodos de reanálisis por calibrar se muestra en la Figura 2. Las coordenadas donde se localiza el AWAC en el sistema CRTM05 y geográficas se muestra en el Cuadro 1.

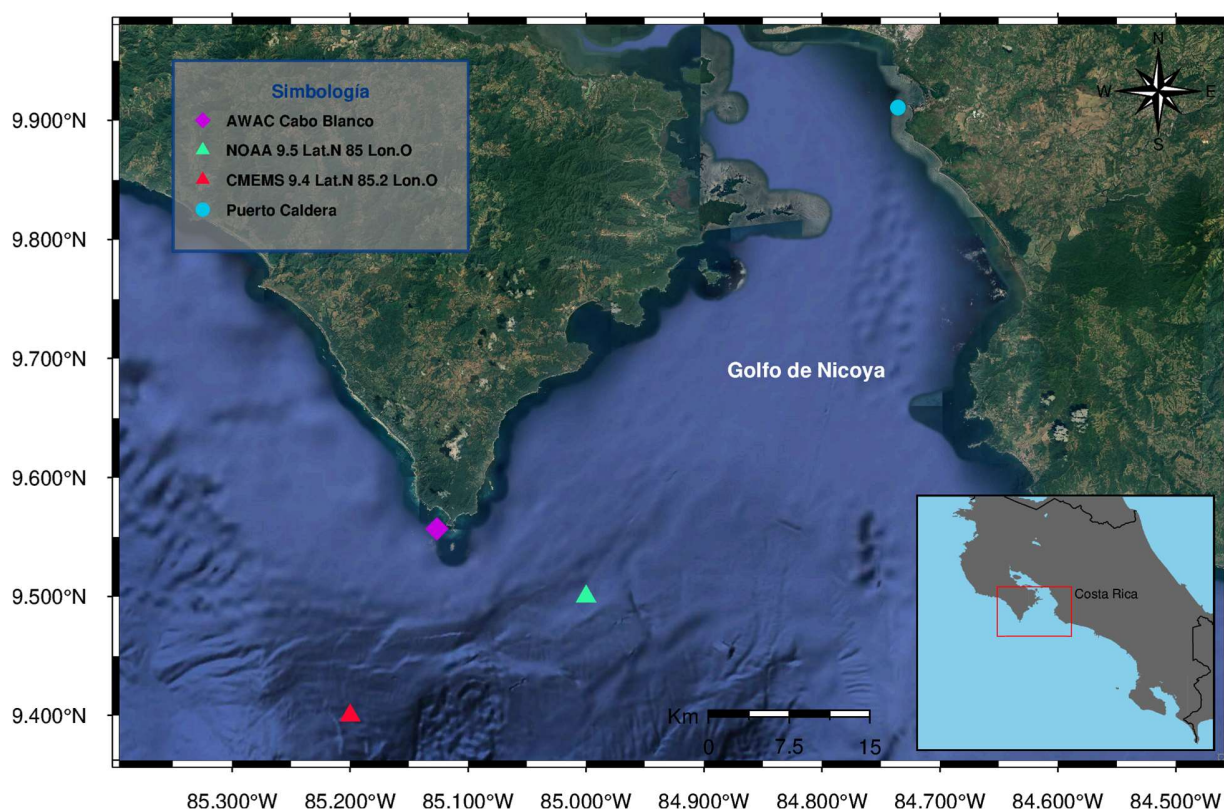


Figura 2. Mapa con la ubicación del equipo de medición AWAC y los dos nodos de reanálisis por calibrar



Cuadro 1. Coordenadas del equipo de medición AWAC

Coordenadas	Este	Norte
CRTM05 (m)	346 345	1 056 937
Geográficas (°)	-85°7'35''	9°33'24.7''

La extensión del registro de datos medidos por el AWAC en Cabo Blanco para este proyecto comprende desde noviembre del 2018 a noviembre del 2022, sumando un total de 11322 estados de mar. Sin embargo, al agregar los datos históricos con los que se cuenta en este sitio, desde enero del 2014, se tiene una cantidad total de 22585 estados de mar medidos. No obstante, el equipo entre los meses de enero a octubre del 2014 se colocó en una ubicación distinta, aproximadamente 3 km hacia el suroeste de la actual. Esta ubicación presentaba problemas de reflexión del oleaje debido a una isla y las condiciones de buceo no eran seguras, por lo que se decidió mover el equipo a la ubicación actual. Por lo tanto, para el objeto de este proyecto se utilizaron los datos medidos entre los años 2015 y 2022.

La Figura 3 muestra los valores espectrales típicos del estado de mar, altura de momento de orden cero H_{m0} , periodo pico T_p , periodo medio T_{m02} y dirección media del oleaje D_m . El gráfico de H_{m0} muestra un comportamiento oscilatorio, con valores menores al inicio del año y máximos a la mitad del año; los valores de H_{m0} se encuentran entre los 0.5 m y 3 m, superando este último valor en algunas ocasiones. En cuanto a los periodos pico T_p , éstos se concentran entre los 10 s a 20 s, con algunos casos inferiores a los 10 s. Con respecto a los periodos medios T_{m02} se centralizan en los 7.5 s y en cuanto a la dirección media predomina el sursuroeste, entre los 180° a 225°.

La Figura 4 muestra la estadística descriptiva para el parámetro H_{m0} , entre los años 2015 a 2022. La Figura 4 (a) muestra un valor promedio de 1.30 m con una desviación estándar de 0.38 m, asimismo se observa que la distribución presenta asimetría positiva. La Figura 4 (b) muestra la probabilidad acumulada para H_{m0} y sus respectivos cuantiles, por ejemplo: el cuantil 50% (mediana) presenta un valor de 1.26 m, por otro lado, el cuantil 95% tiene un valor de 1.98 m. Por último, la Figura 4 (c) muestra la rosa direccional de H_{m0} donde se aprecia que la dirección predominante es la sursuroeste.

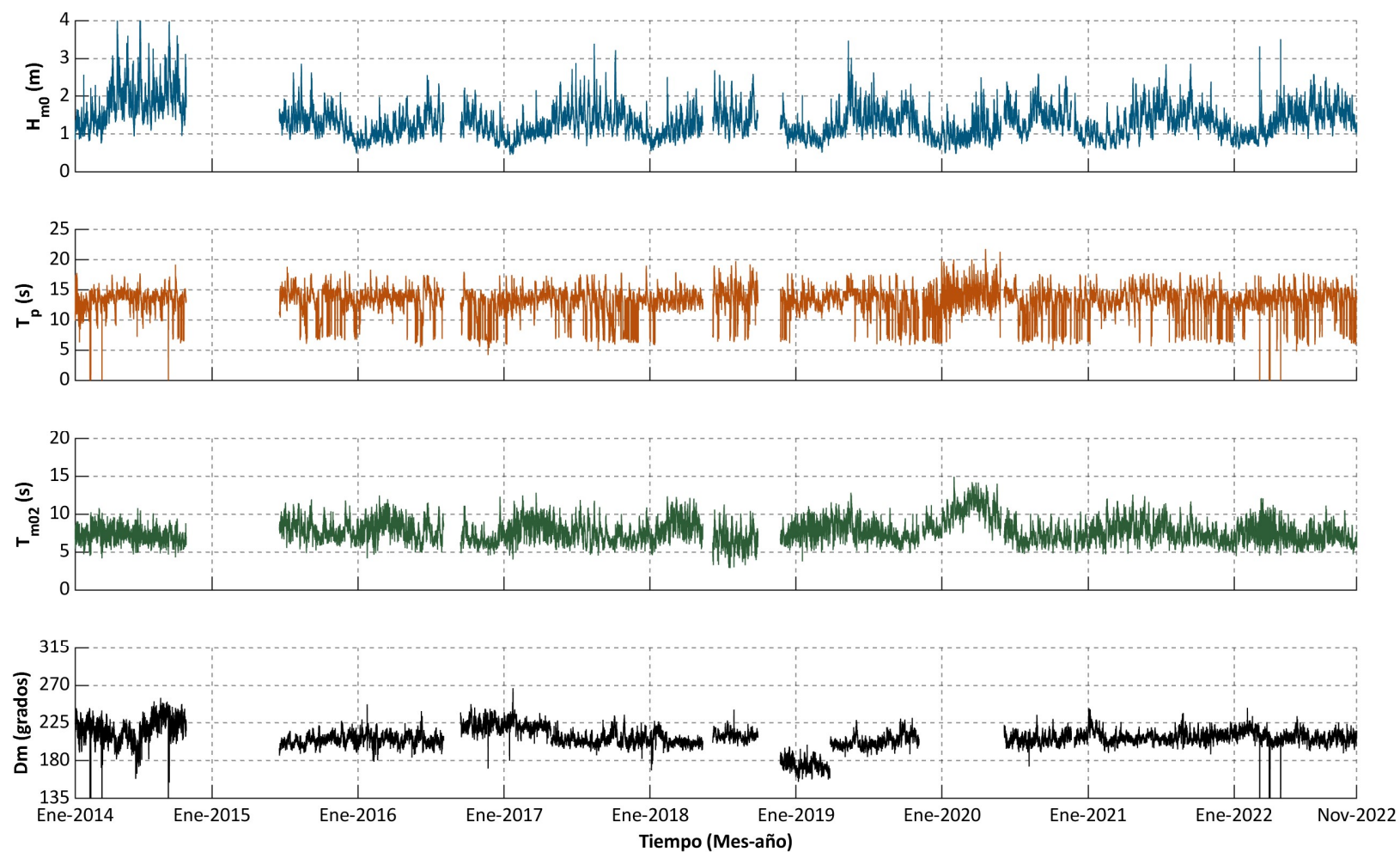
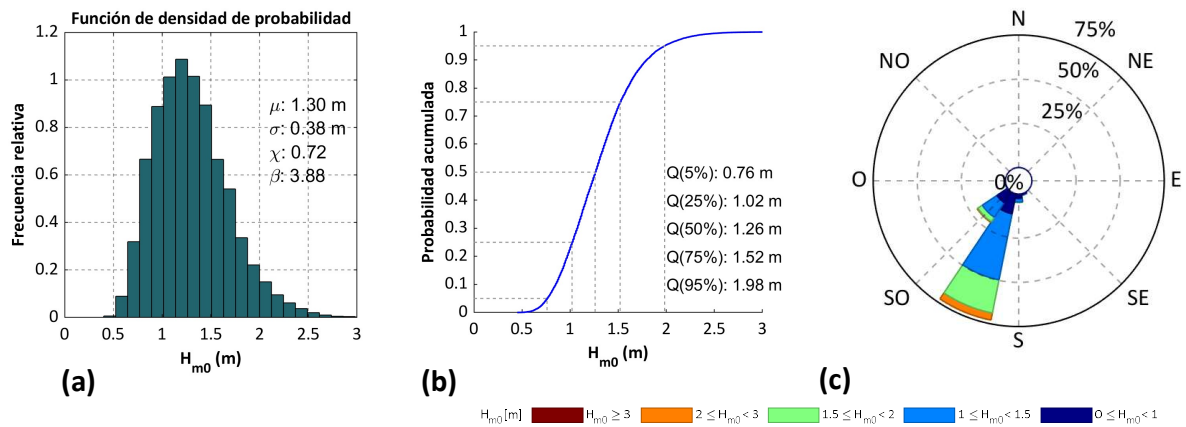
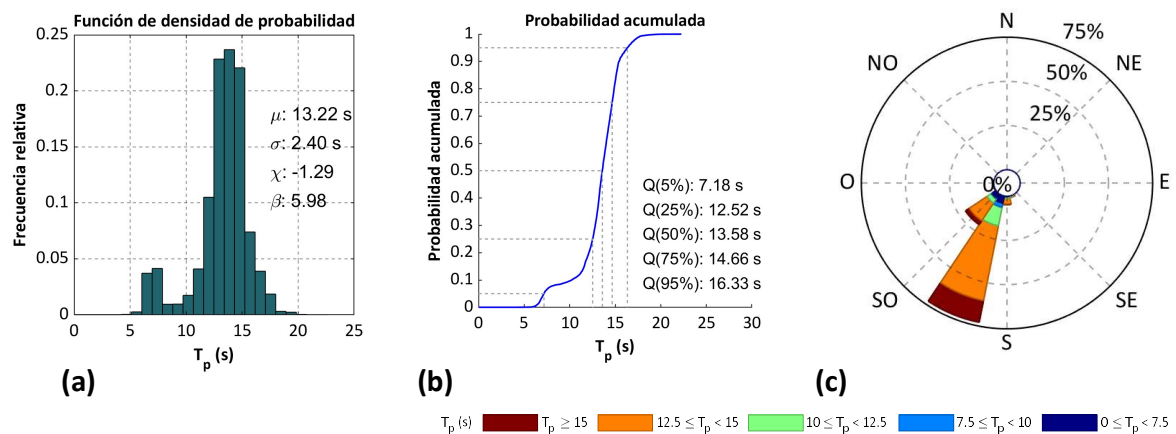


Figura 3. Parámetros espectrales medidos con el equipo AWAC en Cabo Blanco*

* La campaña de noviembre 2019 a mayo 2020 no contiene dirección media debido a un error con el equipo



La Figura 5 (a) muestra el histograma para T_p , se observa un valor promedio de 13.22 s con una desviación de 2.40 s, asimismo se muestra asimetría negativa, debido a una segunda familia de datos que presentan periodos pico inferiores a 10 s. La Figura 5 (b) ilustra la probabilidad acumulada para T_p y sus cuantiles, por ejemplo: la mediana tiene un valor de 13.58 s y el 5 % del tiempo se tienen periodos pico mayores a 16.33 s. Por último, en la Figura 5 (c) se muestra la rosa direccional para T_p donde se aprecia que no hay diferencia en los periodos según la dirección, debido a que la dirección se encuentra centralizada en 225°.





6. BASES DE DATOS DE REANÁLISIS

6.1. Reanálisis del oleaje de la NOAA

El modelo de reanálisis de oleaje de la NOAA denominado *Production Hindcast* utiliza el modelo espectral del oleaje WW3, el cual es forzado con campos de viento a 10 m de altura y campos de hielo obtenidos del Global Forecast System (GFS, por sus siglas en inglés) de la NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (Tolman, 2002)

La malla utilizada en este trabajo corresponde a la global, con una resolución de 30 arcos de minuto y se tiene información disponible a cada 3 h. La batimetría utilizada proviene de ETOPO-1 junto con GSHHS. Los parámetros de salida corresponden con parámetros espectrales del oleaje: altura de ola significativa, periodo pico y dirección media.

La extensión temporal de esta base de datos abarca desde febrero del 2005 a mayo del 2019, relacionado al huso horario UTC (Universal Time Coordinated). La ubicación espacial del nodo de reanálisis de la NOAA con coordenadas 9.5° latitud Norte y 85° longitud Oeste se observa en el mapa de la Figura 2. Los parámetros espectrales de oleaje de este nodo se muestran en la Figura 6. En general se observa del gráfico que las magnitudes de altura de ola significativa se encuentran entre 1 m y 2 m, los periodos pico varían entre 10 s a 20 s, con algunos casos inferiores a los 10 s y la dirección media del oleaje se centra en direcciones sur a suroeste.

La estadística descriptiva para el parámetro H_{m0} del reanálisis de la NOAA se muestra en la Figura 7. De la Figura 7 (a) se observan magnitudes similares a los datos medidos en campo, es decir, un promedio de 1.29 m con una desviación estándar de 0.36 m. La Figura 7 (b) muestra la probabilidad acumulada de H_{m0} durante el periodo cercano a los 15 años, donde el 95% del tiempo los valores serán superiores a 0.78 m y el 5% del tiempo mayores a los 1.93 m. La rosa direccional de la Figura 7 (c) muestra un predominio de las direcciones sursuroeste y suroeste.

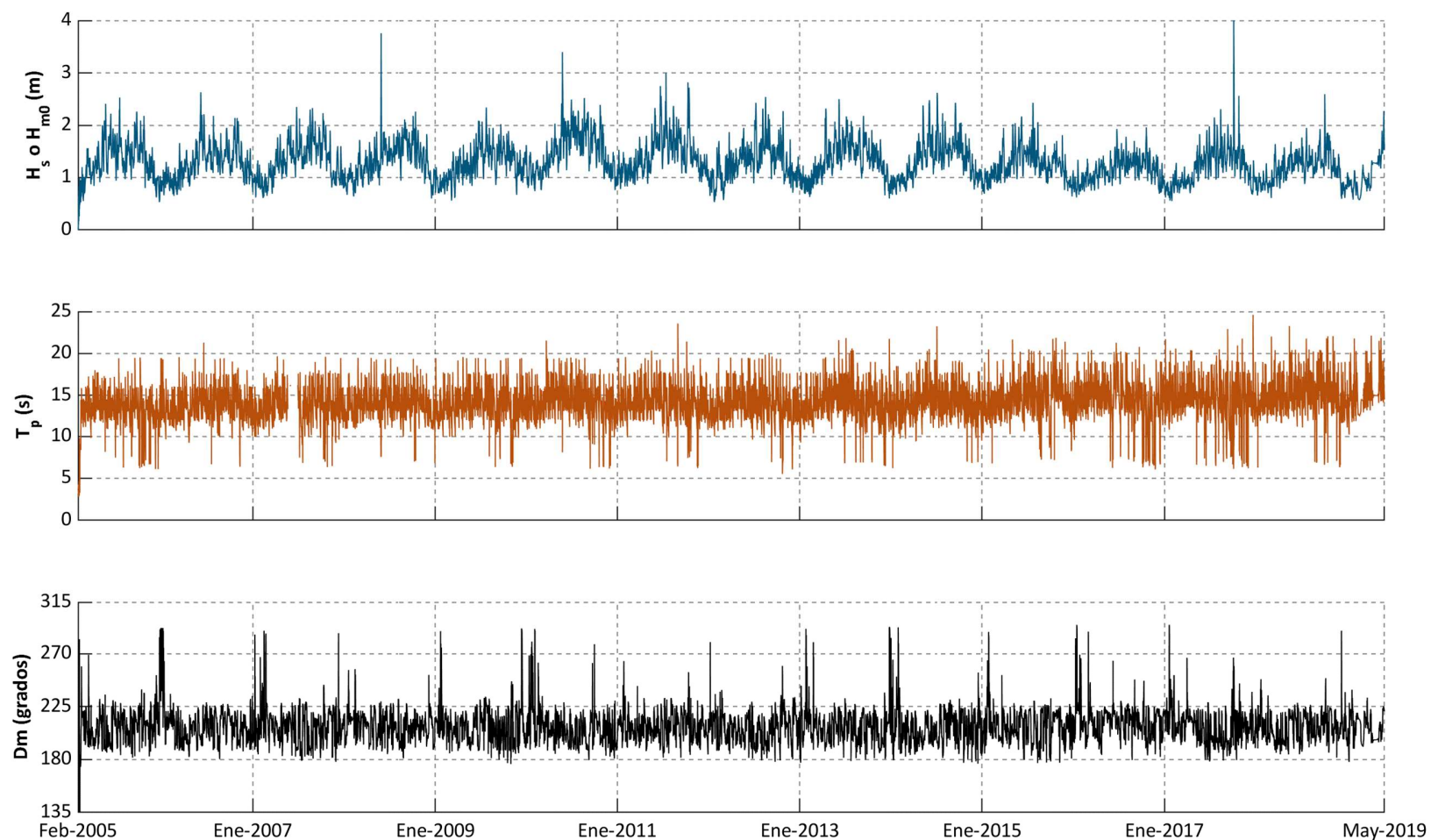


Figura 6. Parámetros espectrales del modelo *Production Hindcast* (WW3) de la NOAA

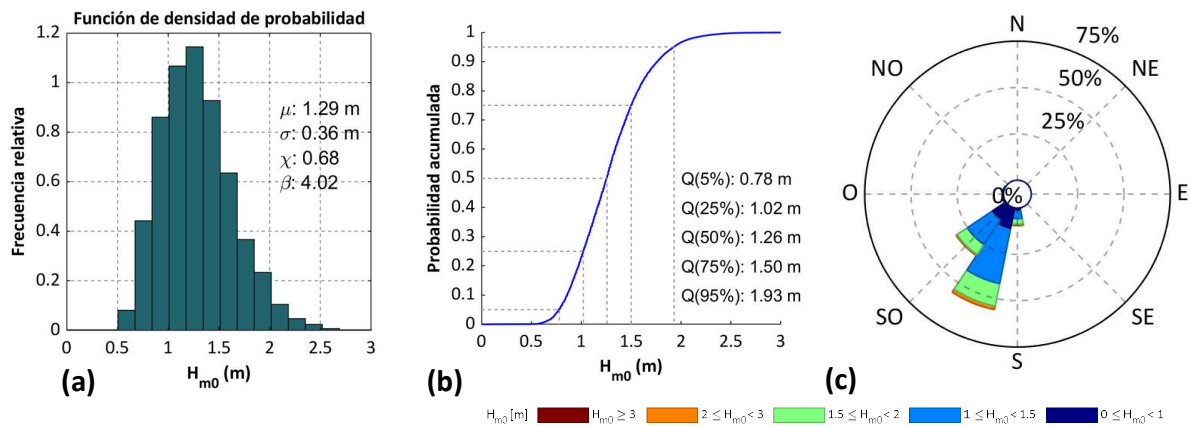


Figura 7. Descripción estadística del parámetro H_{m0} de la NOAA: a) Histograma; b) Función empírica acumulada de probabilidad; c) Rosa direccional

Con respecto a los periodos pico, se hace ver en la Figura 8 (a) el histograma de T_p , donde se aprecia que en promedio se tienen periodos pico de ola de 14.08 s, con una desviación estándar de 2.18 s, asimismo, se nota que existen algunos casos inferiores a los 10 s, pero en menor frecuencia comparado con los datos medidos. La Figura 8 (b) ilustra la probabilidad acumulada, se puede ver que: la mediana presenta un valor de 14.18 s y el cuantil del 95% tiene un valor de 17.65 s. Finalmente, en la Figura 8 (c) no se observa una diferencia en los periodos según la dirección (SSO – SO).

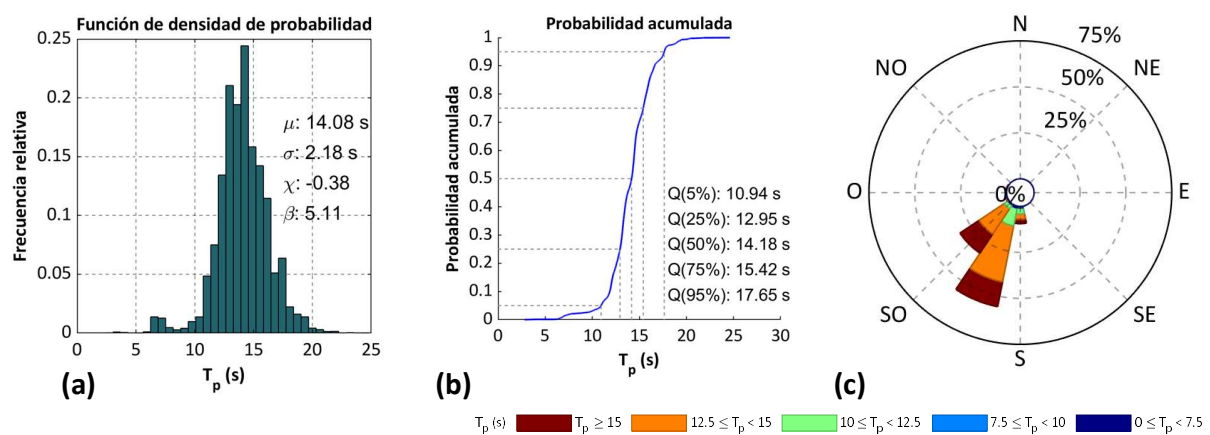


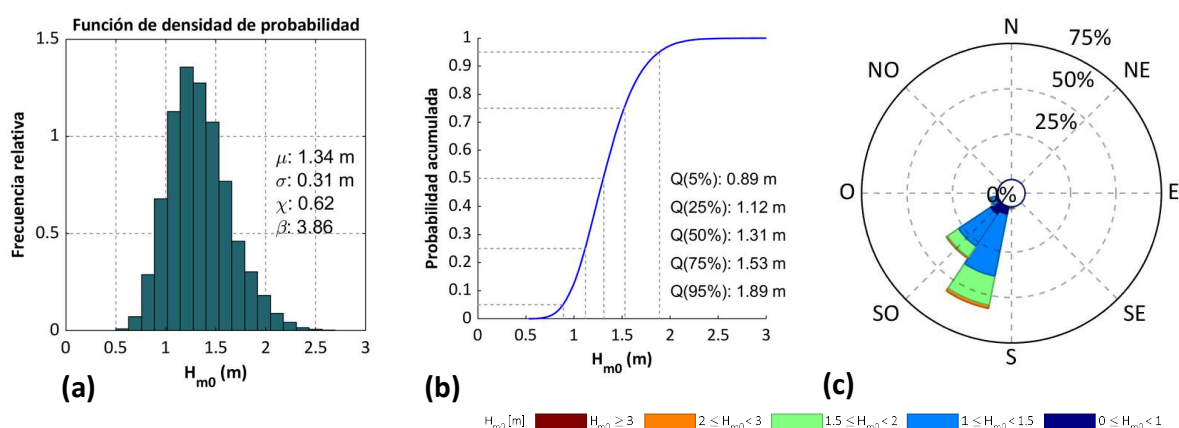
Figura 8. Descripción estadística del parámetro T_p de la NOAA: a) Histograma; b) Función empírica acumulada de probabilidad; c) Rosa direccional

6.2. Reanálisis del oleaje del CMEMS

El modelo de reanálisis de oleaje del CMEMS denominado WAVERYS está basado en el modelo espectral MFWAM, el cual es forzado con campos de viento a 10 m de altura y hielo proveniente del modelo ERA5. La batimetría utilizada corresponde con ETOPO-2. La malla utilizada es global con resolución de $1/5^\circ$ (aproximadamente cada 20 km) y su extensión temporal es de enero de 1993 a diciembre del 2020 (UTC), con una resolución a cada 3 h (Law-Chune et al., 2021).

La ubicación espacial del punto de reanálisis del CMEMS por calibrar con coordenadas de 9.4° latitud Norte y 85.2° longitud Oeste se observa en la Figura 2. Los parámetros espectrales de oleaje de este nodo se muestran en la Figura 10. Los datos mostrados en el gráfico presentan un comportamiento similar a los datos medidos por el AWAC y del nodo de la NOAA. La altura de ola H_{m0} se centra en los 1.5 m, los periodos pico T_p se centralizan en los 15 s y nuevamente se identifica una familia de datos inferior a los 10 s. La dirección media del oleaje coincide igualmente con el predominio en dirección sursuroeste.

La descripción estadística para este nodo del modelo WAVERYS se muestra en la Figura 9 para el parámetro H_{m0} y en la Figura 11 para el parámetro T_p . La Figura 9 (a) muestra la función empírica de probabilidad para el parámetro H_{m0} , asimismo, se observa un valor promedio de 1.34 m asociado a una desviación estándar de 0.31 m. La Figura 9 (b) ilustra la función empírica de probabilidad acumulada, de esta se puede obtener, por ejemplo: que el 95% del tiempo se tienen magnitudes mayores a 0.89 m y el 5% del tiempo valores mayores a 1.89 m, esto para un periodo de 28 años de reanálisis. Las direcciones, al igual que el modelo de la NOAA, predomina las direcciones sursuroeste y suroeste, como se ilustra en la Figura 9 (c).



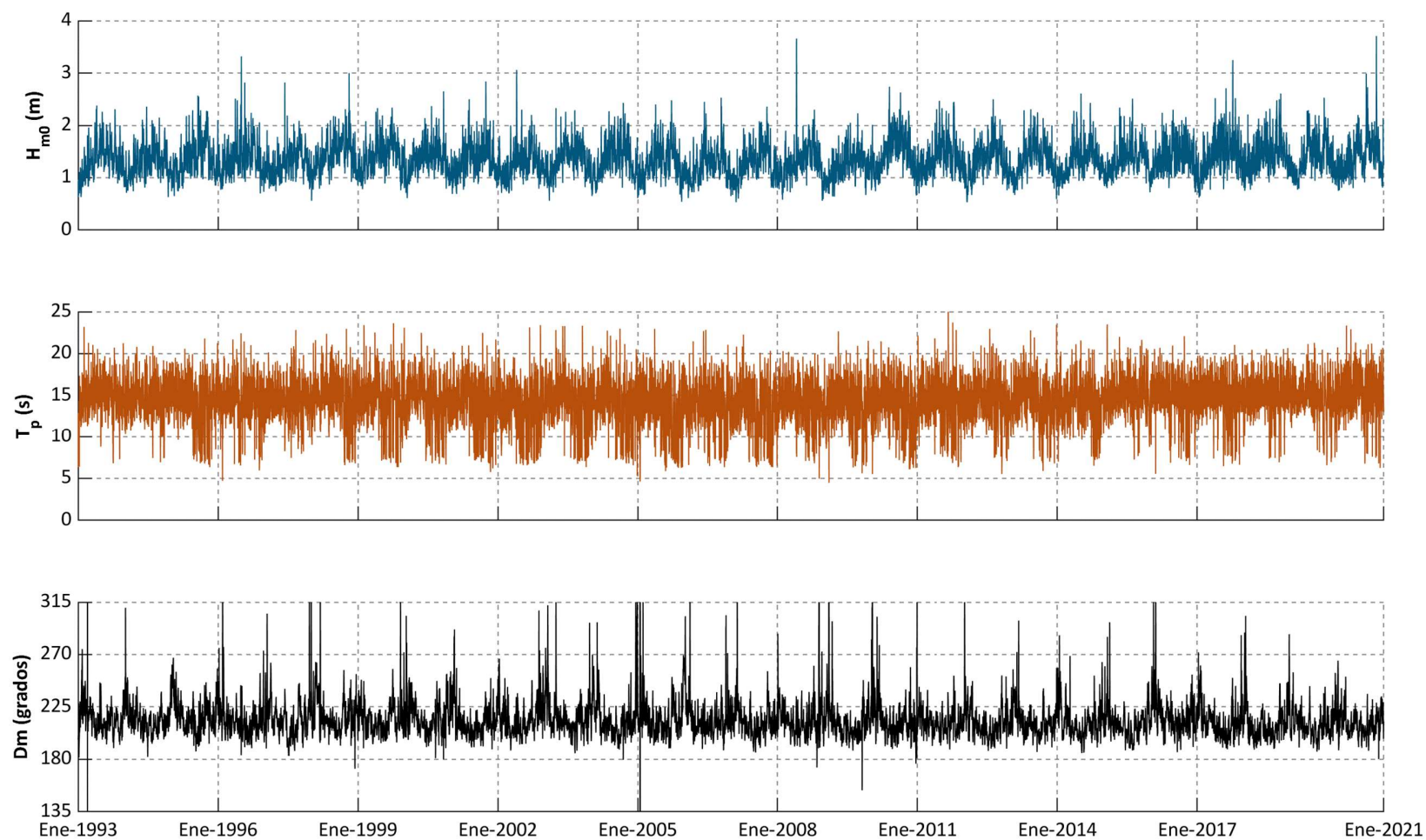


Figura 10. Parámetros espectrales del modelo WAVERYS (MFWAM) del CMEMS

Respecto a los periodos, se tiene un valor promedio de 14.27 s con una desviación estándar de 2.61 s, mostrado en la Figura 11 (a), al igual que los casos anteriores se evidencia una pequeña familia de estados de mar con periodos menores a 10 s. La mediana de T_p para este nodo es de 14.46 s y los periodos de mayor magnitud son mayores a 18.12 s (cuantil del 95%), como se observa en la Figura 11 (b). La Figura 11 (c) revela que, al igual que la NOAA y el AWAC, no hay diferencia de periodos en función de la dirección media de propagación.

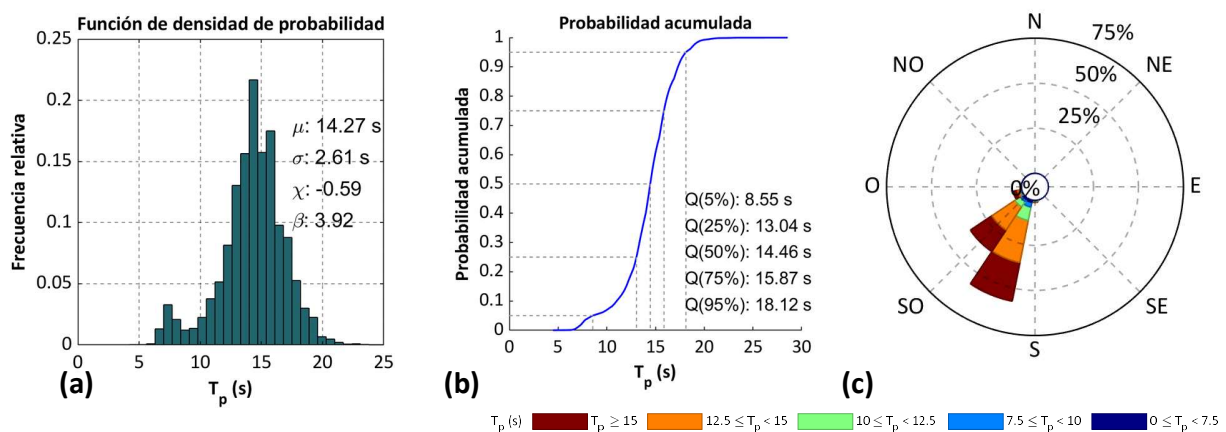


Figura 11. Descripción estadística del parámetro T_p del CMEMS: a) Histograma; b) Función empírica acumulada de probabilidad; c) Rosa direccional

7. METODOLOGÍA

7.1. Metodología de traslado de información desde aguas poco profundas a aguas profundas

Para calibrar un nodo de reanálisis es necesario que exista coincidencia temporal y espacial con la serie de datos instrumental. Debido a que los datos utilizados en este trabajo no cumplen dicho requerimiento, se hace necesario trasladar la información instrumental de aguas someras hacia aguas profundas, donde se encuentra los nodos de los modelos globales de generación y propagación del oleaje (WW3 y MFWAN).

La metodología de traslado de información aplicada en este trabajo se basa en el método del oleaje unitario (Alfaro, Corrales & Govaere, 2019), uso de técnicas de *clustering* (Camus et. al, 2011b), para selección de casos representativos, y herramientas estadísticas de interpolación no-lineal (Camus et. al, 2011a). Estas técnicas se les conoce como *downscaling* y han presentado buenos resultados para aplicaciones en ingeniería de costas (Alfaro-Chavarría, 2017) y (Zumbado, 2021).

El procedimiento de traslado de la información instrumental hacia los nodos de reanálisis se ilustra en el diagrama de la Figura 12. Primero se parte de una serie de datos de reanálisis (NOAA o CMEMS) y la marea astronómica representativa de la zona, a este conjunto de datos se les llamara Datos Deep. Para poder hacer el traslado o despropagación de los datos instrumentales es necesario conocer los coeficientes de propagación en el punto de medición; para el caso de Cabo Blanco los dos procesos de transformación del oleaje son principal refracción y asomeramiento, siendo los coeficientes de propagación conocidos como K_s y K_r respectivamente. Por ende, es necesario propagar cada estado de mar de aguas profundas hacia aguas someras asociado a la extensión temporal de las mediciones instrumentales.

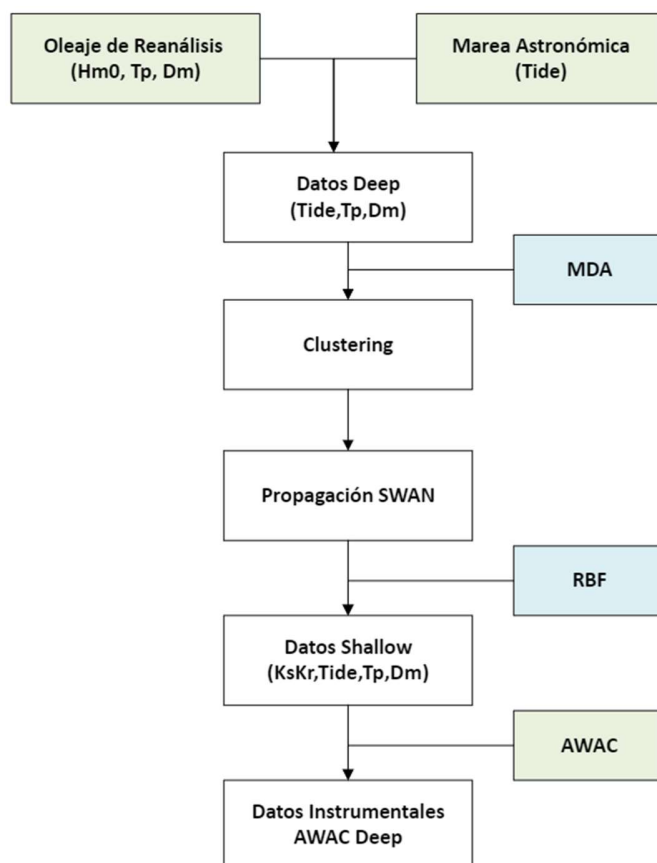


Figura 12. Metodología para el traslado del parámetro H_{m0} medido por el instrumento (AWAC) en aguas someras hacia aguas profundas

Para optimizar las propagaciones del oleaje se usó la técnica de downscaling, por lo que se inicia con la selección o clustering a los Datos Deep (200 casos seleccionados), mediante el Algoritmo de Máxima Disimilitud (MDA, por sus siglas en inglés); en este caso se consideraron los parámetros de marea, periodo pico T_p y dirección media D_m . La altura de ola H_{m0} se utiliza de manera unitaria (Método del oleaje unitario). La Figura 13 muestra la selección de los 200 clústeres representativos de los datos del reanálisis del nodo de la NOAA.

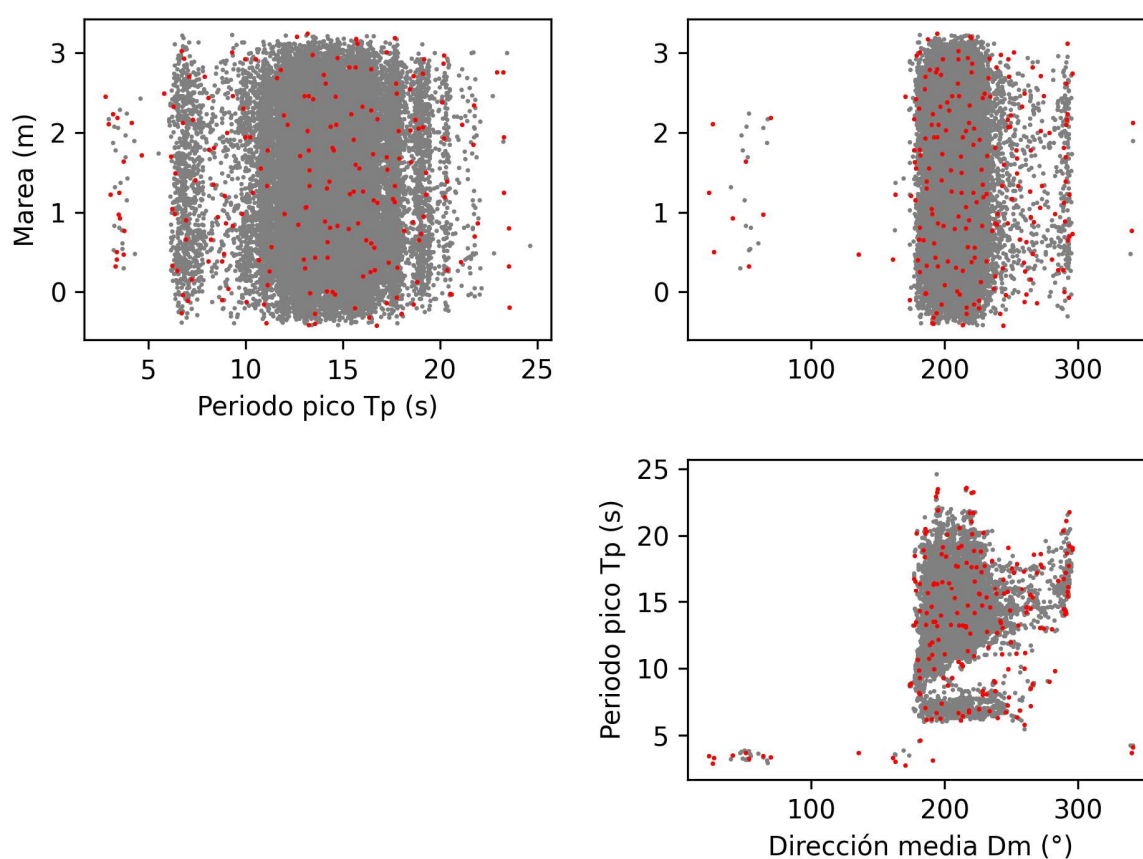


Figura 13. Algoritmo de Máxima Disimilitud (MDA) aplicado a los datos del nodo de la NOAA, en gris se muestra los datos totales y en rojo se muestra los 200 clústeres seleccionados.

Una vez obtenido los 200 clústeres se procede a propagar estos casos de una manera dinámica, con el modelo de generación y propagación de oleaje de tercera generación SWAN (Booij, Ris, & Holthuijsen, 1999). El resultado de este proceso es una serie de datos con los coeficientes de propagación en el punto de medición en Cabo Blanco para cada caso propagado (clústeres en aguas someras).



Para encontrar los Datos *Shallow*, es decir, la serie de datos completa de coeficientes de propagación para toda la extensión temporal del equipo AWAC, se aplican técnicas matemáticas de interpolación, específicamente las Funciones de Base Radial (RBF, por sus siglas en inglés). Esta interpolación contempla los clústeres en aguas profundas, aguas someras y los Datos Deep. Finalmente, se obtiene los Datos *Shallow* que incluye los coeficientes de propagación desde junio del 2015 a noviembre del 2022.

Por último, se toman los valores de H_{m0} medidos por el AWAC y se les divide por los coeficientes de propagación ($K_s K_r$) respectivos (Ecuación 1). De esta manera se obtiene los datos instrumentales en aguas profundas (AWAC Deep), en la misma ubicación del nodo de reanálisis.

$$H_{m0}^{Deep} = \frac{H_{m0}^{AWAC}}{K_s K_r} \quad (1)$$

donde:

H_{m0}^{AWAC} : Altura de ola H_{m0} instrumental medida por el equipo AWAC

H_{m0}^{Deep} : Altura de ola H_{m0} instrumental trasladada hacia aguas profundas (nodo NOAA o CMEMS)

K_s : Coeficiente de asomeramiento

K_r : Coeficiente de refracción

7.2. Metodología de calibración

A partir de los resultados AWAC Deep se calibra el parámetro H_{m0} de cada reanálisis de oleaje NOAA y CMEMS, para los nodos descritos en este trabajo. La calibración se realiza siguiendo la metodología de calibración direccional de Mínguez et al. 2011; la cual utiliza un ajuste potencial cuyos coeficientes de calibración depende de la dirección media del oleaje del reanálisis. El algoritmo matemático utilizado para calibrar es el siguiente:

$$H_{m0}^C = a^R(\theta)[H_{m0}^R]^{b^R(\theta)} \quad (2)$$

donde:

H_{m0}^C : es la altura de ola H_{m0} calibrada del modelo de reanálisis

H_{m0}^R : es la altura de ola H_{m0} del modelo de reanálisis

$a^R(\theta)$ y $b^R(\theta)$: son los coeficientes de calibración en función de la dirección media del oleaje del modelo de reanálisis.

Para medir el error entre ambas series de datos, se utilizan los siguientes descriptores estadísticos:

- BIAS o sesgo: es la definición sistemática entre dos variables, mide la diferencia entre ambas variables y se define como:

$$BIAS = \bar{y} - \bar{x} \quad (3)$$

- RMSE o raíz del error cuadrático medio: mide la exactitud con la que dos variables se parecen, se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

- ρ : el coeficiente de correlación de Pearson. Mide la intensidad de la relación de igualdad entre dos variables. Está definido entre -1 y 1, cuando existe correlación lineal perfecta entre las dos variables (los datos de X e Y son iguales) $\rho=1$ si la correlación es lineal y positiva o $\rho=-1$ si la correlación es lineal y negativa, si $\rho=0$ no hay correlación lineal entre las variables.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

- SI: el índice mide la dispersión de los puntos respecto a la recta bisectriz; si todos los puntos se fijan sobre la recta bisectriz, el parámetro adimensional SI toma el valor de cero:

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (6)$$

donde x son los datos de referencia ($x_1, x_2, \dots, x_b, \dots, x_n$) y y ($y_1, y_2, \dots, y_b, \dots, y_n$) los datos a evaluar o aproximaciones.

Una vez hecha la calibración y obtenido los coeficientes de calibración se aplica la Ecuación 2 a todos los valores de H_{m0} del nodo de reanálisis respectivo. Finalmente, se obtiene la serie de reanálisis calibrada para el modelo del CMEMS y de la NOAA.

8. RESULTADOS

8.1. Traslado de información instrumental en aguas profundas

La Figura 14 muestra dos histogramas con todos los coeficientes de propagación obtenidos a partir de forzar el modelo SWAN con los reanálisis de oleaje la NOAA y del CMEMS. En general, se observa que los coeficientes son menores a 1, por lo que se pierde energía en la propagación, y la mayoría de los datos se concentra entre los valores de 0.85 a 0.9. Además, el promedio para ambos nodos presenta un valor de 0.87 con una desviación estándar de 0.04. La diferencia entre ambos resultados se observa en las colas de la distribución, debido a que los datos de la NOAA están más concentrados en 0.87 y los datos del CMEMS tienen mayor cantidad de datos en ambas colas.

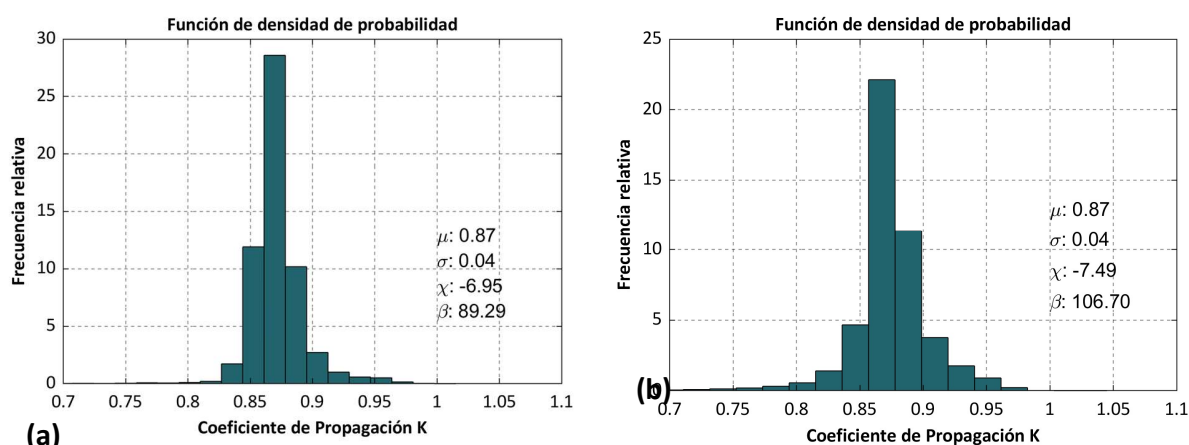


Figura 14. Histogramas de coeficientes de propagación $K_s K_r$ en Cabo Blanco, forzados con: (a) nodo de la NOAA; (b) nodo del CMEMS



La Figura 15 muestra la serie temporal del parámetro H_{m0} medida por el AWAC y la misma serie trasladada hacia el nodo de reanálisis en aguas profundas, es decir, dividiendo entre los coeficientes de propagación (Ecuación 1). La Figura 15 (a) muestra los resultados del traslado con el forzamiento de los datos de la NOAA, en esta se observa cómo se incrementa la energía al dividir por los coeficientes ($K_s K_r$). La Figura 15 (b) muestra los resultados pero correspondiente al nodo de reanálisis del CMEMS, el cual, a diferencia de la NOAA, se extiende hasta diciembre del 2020.

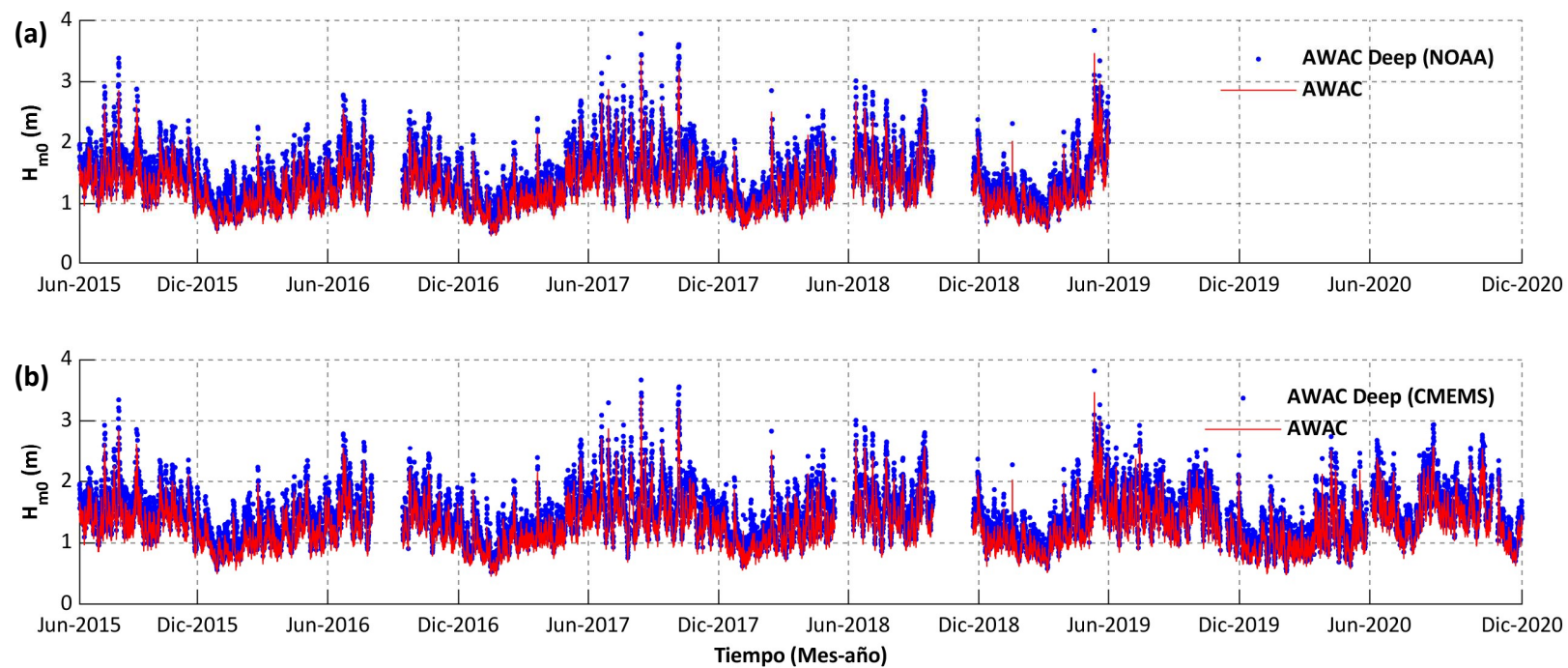


Figura 15. Series temporales del parámetro H_{m0} medidas en aguas someras (AWAC) y trasladadas hacia aguas profundas (AWAC Deep), forzado con: (a) NOAA; (b) CMEMS

8.2. Calibración datos de la NOAA

La Figura 18 muestra la comparación entre los datos AWAC Deep y la información del reanálisis de la NOAA. Se observa que existe correlación temporal entre ambas series de datos, aumentando la energía a mediados de año y disminuyendo a principio de año. Además, se evidencia que los valores de la NOAA son inferiores a los datos instrumentales trasladados. Asimismo, el gráfico de los periodos pico y las direcciones presentan un buen comportamiento y magnitud a las mediciones instrumentales.

La Figura 18 ilustra varios gráficos con los resultados de la calibración. Primero, se observa de la Figura 18 (a) que las magnitudes de la NOAA se amplificaron y se ajustaron de mejor manera a la serie instrumental (AWAC Deep). Segundo, de los gráficos de dispersión (Figura 18 (b) y (c)) se identifica una mejoría en los descriptores estadísticos de los datos sin calibrar comparado con los datos calibrados, esto se refleja en la disminución del sesgo (BIAS), que pasa de 0.27 m a 0.006 m, asimismo, el error RMSE disminuye de 0.37m a 0.26 m y el SI disminuye de 0.26 a 0.18. Por último, la Figura 18 (d) ilustra la curva de probabilidad acumulada, en donde se aprecia que la curva de datos calibrados se ajusta a los datos instrumentales.

Uno de los productos de la calibración corresponde con los parámetros de calibración a y b . La variación de estos parámetros en función de la dirección media se muestra en la Figura 16. El gráfico muestra que los parámetros de importancia están concentrados entre los 135° a 292.5° , que coinciden con las direcciones medias de propagación que inciden en el litoral del Pacífico de Costa Rica. En el Cuadro 2 se observan las magnitudes del parámetro a , variando entre 1.16 a 1.28, así como una variación del parámetro b de 0.83 a 1.26.

Cuadro 2. Parámetros de calibración para datos de la NOAA

θ	$a \pm CI^{95\%}$	$b \pm CI^{95\%}$
135.0°	1.28 ± 0.012	0.98 ± 0.019
157.5°	1.28 ± 0.012	1.06 ± 0.021
180.0°	1.16 ± 0.012	1.21 ± 0.016
202.5°	1.18 ± 0.012	1.26 ± 0.015
225.0°	1.26 ± 0.011	0.89 ± 0.011
247.5°	1.22 ± 0.010	0.83 ± 0.008
270.0°	1.26 ± 0.010	0.90 ± 0.009
292.5°	1.25 ± 0.010	0.88 ± 0.009

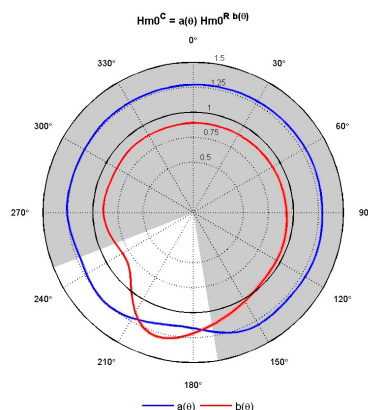


Figura 16. Parámetros de calibración de la NOAA en función de la dirección media

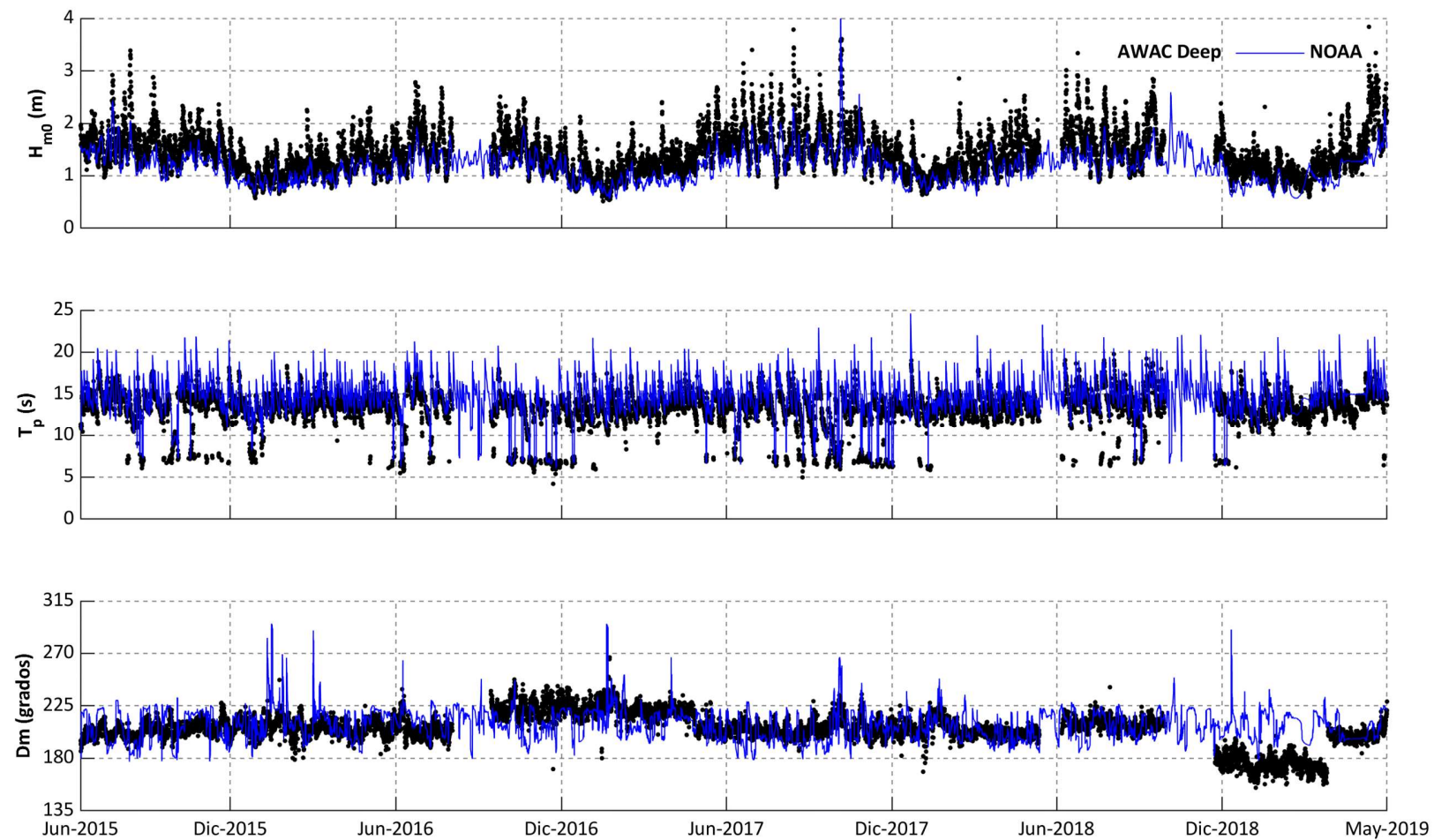
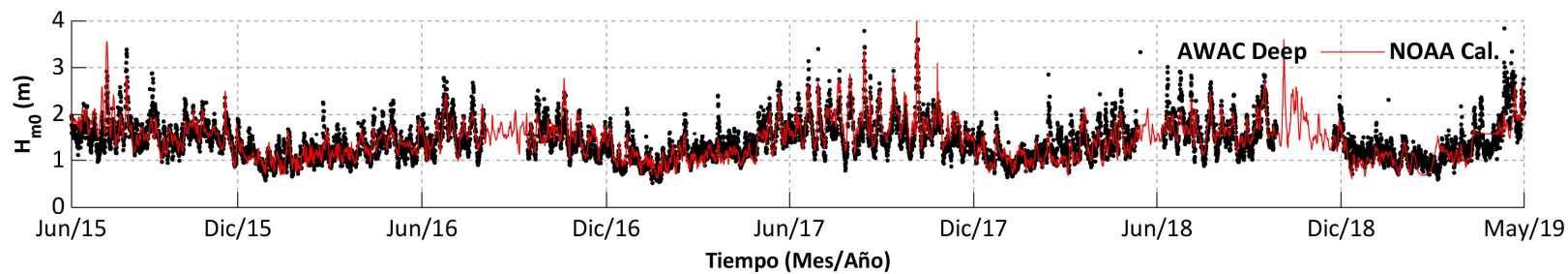
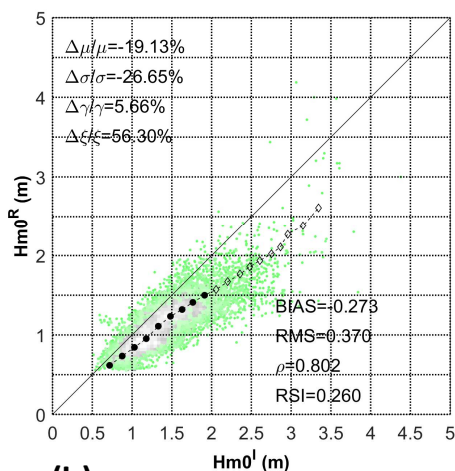


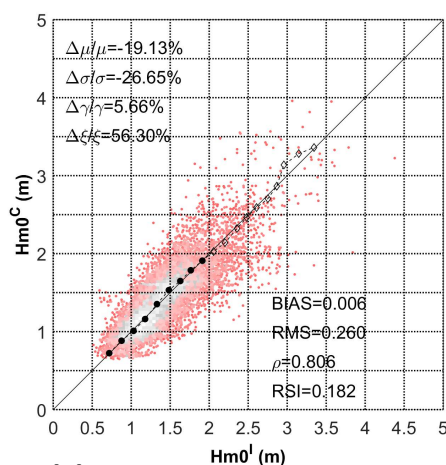
Figura 17. Parámetros espectrales para los datos del nodo de reanálisis de la NOAA y los datos AWAC Deep



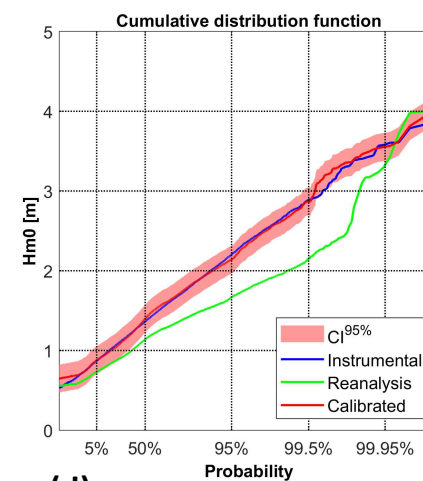
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18. Calibración nodo de reanálisis de la NOAA: (a) serie temporal del parámetro H_{m0} calibrado y AWAC Deep; (b) gráfico de dispersión de los datos sin calibrar; (c) gráfico de dispersión de los datos calibrados; (d) función acumulada de probabilidad para los datos instrumentales, reanálisis y calibrados.

8.3. Calibración datos del CMEMS

La Figura 20 muestra la comparativa entre los parámetros espectrales de oleaje del nodo de reanálisis del CMEMS y los datos del AWAC Deep. En este caso se observa del gráfico que las magnitudes de H_{m0} para el reanálisis son similares al AWAC Deep. De igual forma, los periodos pico y las direcciones presentan un buen ajuste en magnitud y tendencia.

La Figura 21 muestra los gráficos de calibración para el nodo de reanálisis del WAVERYS-CMEMS. Primero, de la Figura 21 (a) se observa un mejor ajuste del parámetro H_{m0} para las magnitudes superiores. Segundo, en la Figura 21 (b) y (c), se ilustran los gráficos de dispersión, para el caso sin calibrar (datos en verde) se nota principalmente un sesgo en los cuantiles superiores hacia los datos instrumentales, luego, con la calibración (datos en rojo) se realiza una corrección y se ajustan las magnitudes a la recta bisectriz. Esta mejoría en la dispersión se refleja con la reducción del BIAS de 0.051 m a 0.026m, además, el coeficiente de correlación es de 0.87, el cual es superior a la correlación de la NOAA con un valor de 0.81. Por último, de la Figura 21 (d) se aprecia como la curva de probabilidad acumulada calibrada se apeg a los datos instrumentales.

Finalmente, en la Figura 19 y Cuadro 3 se muestran los parámetros de calibración a y b . La Figura 19 muestra los parámetros en función de la dirección de incidencia del oleaje, la cual se concentran entre los 135° a 292.5° . En el Cuadro 3 se observan las magnitudes del parámetro a , variando entre 0.91 a 1.06, así como una variación del parámetro b de 0.95 a 1.41.

Cuadro 3. Parámetros de calibración para datos del CMEMS

θ	$a \pm CI^{95\%}$	$b \pm CI^{95\%}$
135.0°	0.96 ± 0.011	1.25 ± 0.017
157.5°	0.95 ± 0.011	1.26 ± 0.016
180.0°	0.98 ± 0.011	1.23 ± 0.015
202.5°	0.96 ± 0.010	1.28 ± 0.013
225.0°	1.06 ± 0.009	0.95 ± 0.009
247.5°	0.93 ± 0.008	1.25 ± 0.013
270.0°	0.88 ± 0.009	1.41 ± 0.027
292.5°	0.91 ± 0.010	1.31 ± 0.028

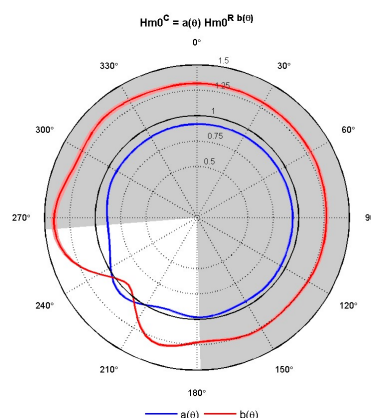


Figura 19. Parámetros de calibración del CMEMS en función de la dirección media

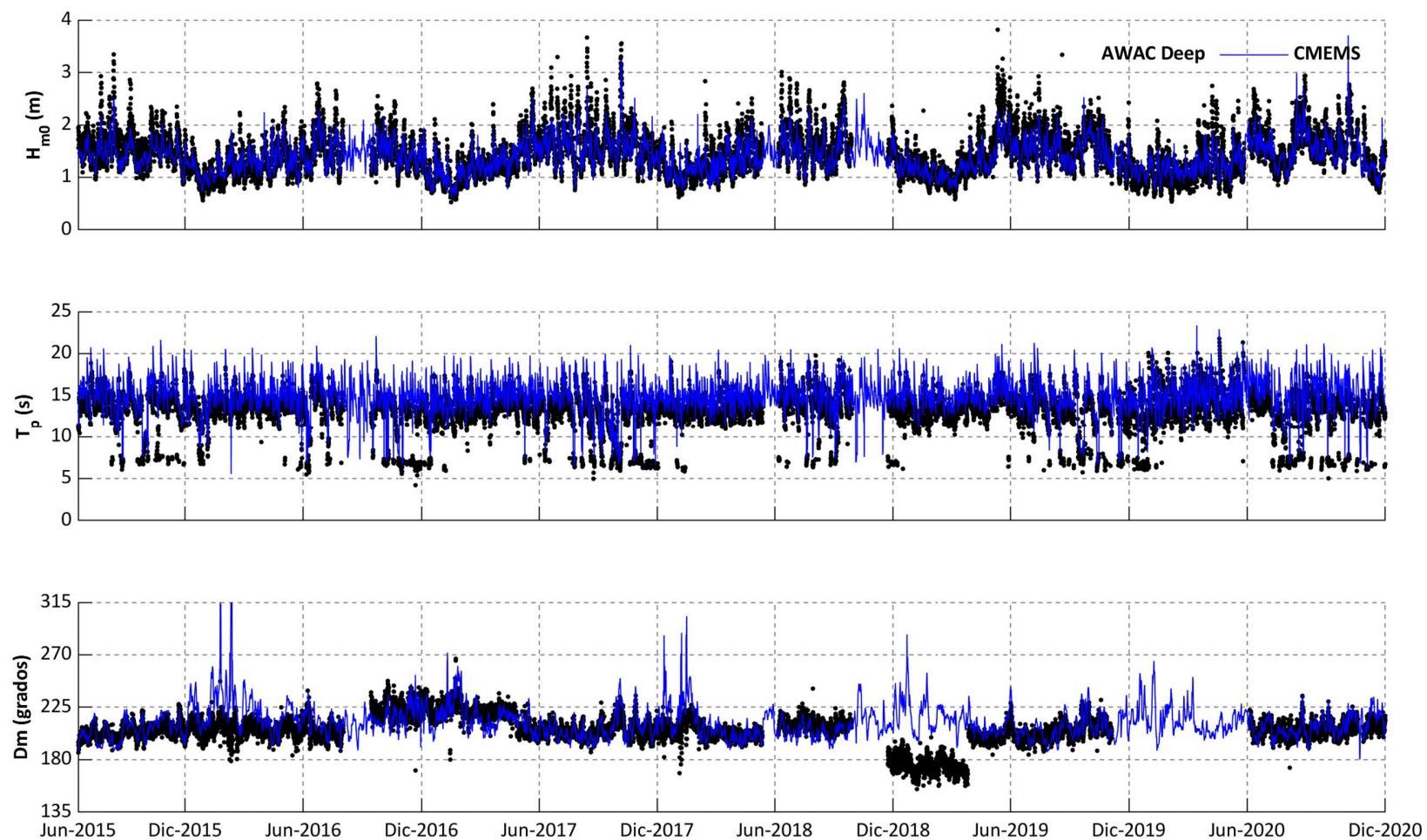
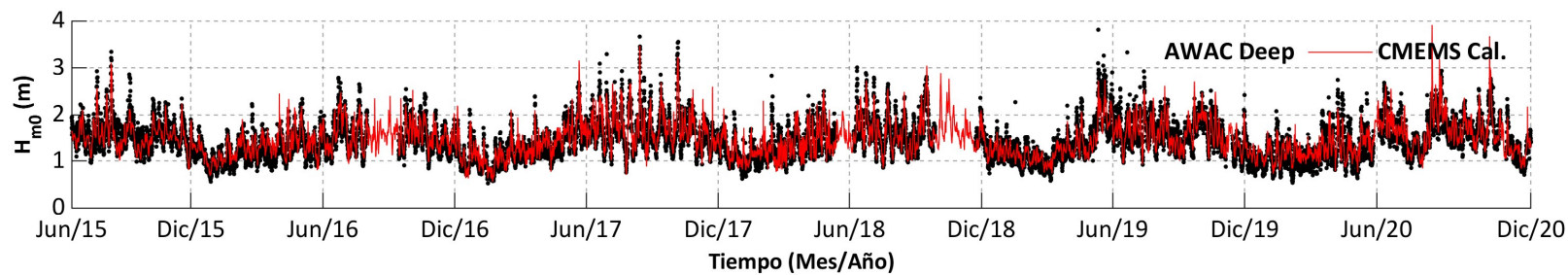
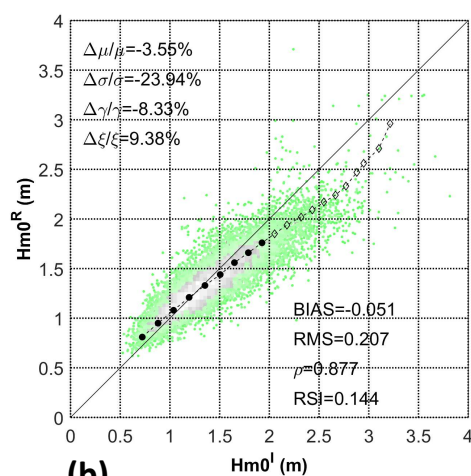


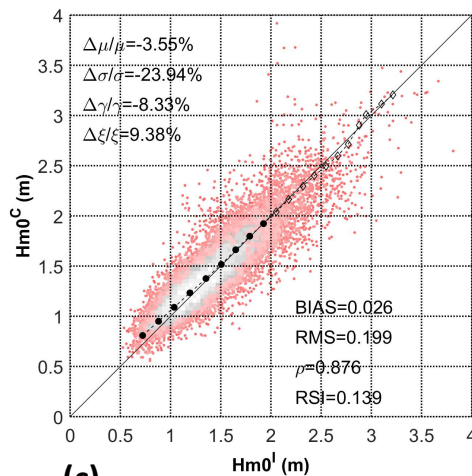
Figura 20. Parámetros espectrales para los datos del nodo de reanálisis del CMEMS y los datos AWAC Deep



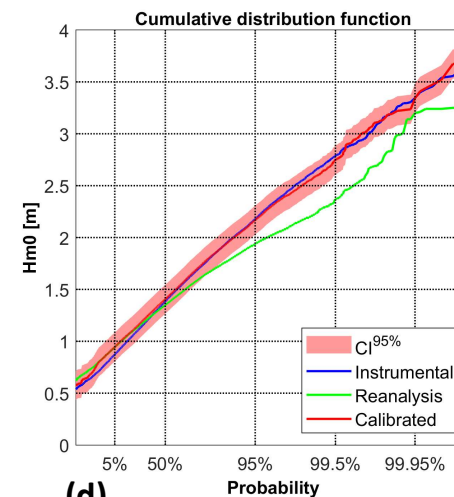
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 21. Calibración nodo de reanálisis del CMEMS: (a) serie temporal del parámetro H_{m0} calibrado; (b) gráfico de dispersión de los datos sin calibrar; (c) gráfico de dispersión de los datos calibrados; (d) función acumulada de probabilidad para los datos instrumentales, reanálisis y calibrados.



9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1. Conclusiones

Se realizaron las mediciones instrumentales del oleaje en la ubicación acordada cerca de la Reserva natural absoluta de Cabo Blanco, por el periodo contratado en esta consultoría (noviembre 2017 a noviembre 2022). A estos datos se le incorporaron las mediciones realizadas entre los años 2014 al 2017, obteniendo una base de datos tres horaria y cuasi continua, de cerca de 9 años de extensión. Se analizaron los datos y se mostró la estadística descriptiva de los parámetros espectrales obtenidos de las mediciones.

Se realizó un traslado de información de aguas someras hacia aguas profundas, para poder comparar los datos instrumentales con los modelos de reanálisis y posteriormente realizar la calibración de la altura de ola H_{m0} respectiva. Para ello se aplicaron metodologías de clústeres e interpolación no lineal que permitieron optimizar el tiempo de cálculo de las simulaciones y obtener datos confiables para aplicaciones ingenieriles.

Se realizó la calibración direccional del nodo de reanálisis de la NOAA con los datos instrumentales de Cabo Blanco. Los resultados obtenidos del proceso de calibración se han medido por medio de parámetros estadísticos que indican de manera cuantitativa la calidad del ajuste. Según los valores de dichos parámetros se considera que se ha logrado una adecuada calibración.

Como resultado adicional de esta consultoría se agregó la calibración del nodo de reanálisis del CMEMS, el cual presenta una mayor extensión temporal y de actualización continua. Los principales resultados muestran que la correlación de los datos instrumentales con respecto a los del modelo MFWAM del CMEMS, son mejores a los del modelo WW3 de la NOAA. Por otro lado, se realizó la calibración respectiva y se logró una adecuada calidad de ajuste para el parámetro H_{m0} de esta base de datos de reanálisis.

El resultado final engloba el nodo de reanálisis calibrado de la NOAA (2005 a 2019), el nodo de reanálisis calibrado del CMEMS (1993 a 2020), los parámetros de calibración respectivos y las mediciones realizadas en campo por el equipo AWAC (2014-2022). Estas bases de datos se adjuntan como archivos de texto externos a este documento.



9.2. Recomendaciones

Continuar con los esfuerzos de las mediciones de campo en Cabo Blanco y ampliarla a otros sitios estratégicos, para crear una base de datos lo suficientemente extensa, con el fin de mejorar la exactitud de la función de calibración obtenida, para que represente de mejor manera tanto los eventos de baja, mediana y alta energía, así como también procesos de media escala temporal como el ENOS.

Ampliar la red de medición a al menos cuatro sitios más; dos en el Pacífico, uno al Norte cercano a Cabo Velas y otro al Sur frente a la península de Osa; dos en el Caribe, uno frente al complejo portuario Limón Moín y otro en el Caribe sur. Lo anterior con el fin de replicar el trabajo realizado a otros nodos de la NOAA o CMEMS, y de esta manera utilizar dicha información, la cual presenta un papel fundamental en distintos procesos naturales evidentes en la zona costera, como los procesos de erosión y acumulación litoral, el transporte de nutrientes necesarios para la producción pesquera y cultivo de especies comestibles, la regeneración de sistemas coralinos y el diseño de estructuras artificiales de protección costera y portuaria, entre otros.

Realizar un trabajo de regionalización para trasladar la base de datos de oleaje del nodo que ha sido calibrado, hasta aguas poco profundas, específicamente frente a la entrada al Puerto de Caldera, dentro del mismo y otros sitios de interés frente a la costa.



10. REFERENCIAS

- Alfaro, H., Corrales, M., & Govaere, G. (2019). Evaluando un nodo de reanálisis de oleaje mediante información de una boya colocada en aguas intermedias. *Revista Ingeniería*, 29 (2), 1–11. doi:<https://doi.org/10.15517/ri.v20i2.35937>
- Alfaro-Chavarría, H. (2017). *Estudio de la dinámica del oleaje en el litoral pacífico de Costa Rica: Metodología de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo*. Universidad de Cantabria.
- Booij, N., Ris, R. C., & 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. doi:<https://doi.org/10.1029/98JC02622>
- Camus, P., Mendez, F., & Medina, R. (2011a). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 851 - 862.
- Camus, P., Mendez, F., Medina, R., & Cofiño, A. (2011b). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 453-462.
- Law-Chune, S., Aouf, L., & Dalphinnet, A. a. (2021). WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period. *Ocean Dynamics*, 71, 357-378. doi:<https://doi.org/10.1007/s10236-020-01433-w>
- Mínguez, R., Espejo, A., Tomás, A., & Méndez, F. &. (2011). Directional calibration of wave reanalysis databses using instrumental data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(11), 1466-1485. doi:<https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00008.1>
- Tolman, H. (2002). User manual and system documentation of wavewatch-iii version 2.22. *NOAA/NWS/NCEP Technical Note*.
- Zumbado, J. G. (2021). *Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica*. Montes de Oca, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.