

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Análisis del clima marítimo de aguas intermedias y su potencial energético en la zona de influencia de los principales puertos del Caribe colombiano*Analysis of wave climate and energy potential of intermediate waters in the marine sphere of influence of the main ports of the Colombian Caribbean*DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.620> Fecha de recepción: 2023-08-17 / Fecha de aceptación: 2023-11-10Claudia Patricia Urbano-Latorre¹, Claudia Janeth Dagua Paz², Andrés Felipe Camilo Martínez³**CITAR COMO:**

Urbano-Latorre, C. P.; Dagua Paz, C. J.; Camilo Martínez, A. F. (2023). Análisis del clima marítimo de aguas intermedias y su potencial energético en la zona de influencia de los principales puertos del Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 42(2): 27-46. ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2023.620>

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio del clima de oleaje para el mar Caribe colombiano, entre las coordenadas 8° N y 16° N de latitud y 84° W y 70° W de longitud, y su potencial energético en los puntos de aguas intermedias en el área de influencia marítima en los principales puertos del Caribe colombiano, que sirven de insumo a los intereses marítimos del país. Se realizó con base en análisis de simulaciones de propagación de oleaje de un período de 30 años elaborado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, utilizando el modelo Simulating Wave Nearshore, forzado con los vientos del Reanálisis Regional de América del Norte de 1979 a 2010, y validado con información de boyas direccionales de la Dirección General Marítima y de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica en el mar Caribe. Los resultados muestran cuatro regiones del Caribe colombiano con características similares de altura, período y dirección de ola. La primera es la región insular de San Andrés y Providencia; la segunda, una región sur entre Urabá y Cartagena; una tercera es la región central, entre Barranquilla y Santa Marta; la cuarta corresponde a la parte norte, entre Riohacha y Puerto Bolívar. Los valores más altos de altura de ola se observan en Barranquilla y Santa Marta y los más bajos en Urabá. Adicionalmente, se evaluó la capacidad de energía renovable obtenida por medio del oleaje a partir del espectro de energía potencial para boyas virtuales en los principales puertos. Se encontró que la energía se concentra entre 4 s a 6 s de período, y entre 0.5 m y 3 m en alturas de ola, para las boyas de Barranquilla, Santa Marta, Puerto Bolívar y Providencia; siendo Barranquilla el sitio de mayor potencial que se encuentra entre 7 s y 4 m, seguida de Santa Marta entre 6 s y 3.8 m. El potencial energético promedio anual presenta valores altos entre diciembre y marzo; medios, entre junio y agosto; valores bajos, en mayo, y entre septiembre y noviembre, correspondientes a las épocas seca y húmeda. Las condiciones del oleaje encontradas superan el umbral necesario para generar energía con un sistema de energía alternativa tipo Wave Energy Converter, con potenciales de rendimiento aceptables que podrían multiplicarse mediante la instalación de parques energéticos.

PALABRAS CLAVE: climatología de olas, modelo SWAN, Caribe colombiano, potencial energético del oleaje.

¹ Orcid: 0000-0002-2800-368X. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: curbano@dimar.mil.co

² Orcid: 0000-0003-2865-6119 Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: claudia.dagua@gmail.com

³ Orcid: 0009-0000-5507-7580. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", isla de Manzanillo, barrio El Bosque, Colombia. Correo electrónico: acamilo@dimar.mil.co

ABSTRACT

This paper presents a study of the wave climate of the Colombian Caribbean Sea, between coordinates 8° N and 16° N latitude and 84° W and 70° W longitude, and the energy potential at intermediate water points within the area of the Colombian Caribbean, which serve as inputs for the country's maritime interests. It was carried out based on the analysis of wave propagation simulations for 30 years developed at the Center for Oceanographic and Hydrographic Research of the Caribbean (CIOH), using the SWAN (Simulating WAVes Nearshore) model, forced with the winds of the North American Regional Reanalysis (NARR) from 1979 to 2010 and validated with directional buoy data from the Colombian General Maritime Directorate (Dimar) and the United States National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) in the Caribbean. The results show four regions of similar wave height, period, and directional characteristics in the Colombian Caribbean. The first is the region around the islands of San Andrés and Providencia, and the second is a southern region between Urabá and Cartagena. A third comprises the central region around Barranquilla and Santa Marta, and the fourth, between Riohacha and Puerto Bolívar, occupies the northern part. The highest wave height values are observed for Barranquilla and Santa Marta, while the lowest are at Urabá. Furthermore, we evaluated the renewable wave energy capacity by studying the potential energy spectrum for virtual buoys in the primary ports. We observed that the energy was concentrated between 4 s and 6 s, with wave heights ranging from 0.5 m to 3 m for buoys in Barranquilla, Santa Marta, Puerto Bolívar, and Providencia. Amongst these, Barranquilla displayed the highest potential, with a period of 7 s and a wave height of 4m, followed by Santa Marta with values of 6 s and 3.8 m. The annual pattern of average energy potential revealed high values between December and March, medium values from June to August, and low values in May and between September and November; demonstrating that there is greater energy in the dry seasons and lower energy in the wet seasons. The wave conditions detected surpass the necessary threshold for energy generation via a Wave Energy Converter (WEC) alternative energy system, offering highly promising yield potentials, which could be magnified through the use of energy parks.

KEYWORDS: *wave climatology, SWAN model, Colombian Caribbean Sea, wave potential energy*

INTRODUCCIÓN

La riqueza y diversidad de los recursos energéticos marinos de las cuencas del Atlántico y el Pacífico son un privilegio para Colombia, que cuenta con alrededor de 892 118 km² de territorio marino en ambas cuencas (Invemar, 2015). Adicionalmente, debido la adición de Colombia a diferentes convenios marítimos internacionales, es necesario adelantar los estudios marítimos que permitan conocer las aguas territoriales con fines como la navegación, actividades de intercambio de mercancías, transporte de pasajeros, diseño del artefactos navales y fines turísticos entre otros (Dimar, 2023).

La Dirección General Marítima (Dimar), como autoridad marítima nacional, ha abanderado estudios oceanográficos, meteorológicos e hidrográficos que permiten conocer las condiciones de los mares y costas de la jurisdicción colombiana, a través de sus centros de investigaciones científicas marinas ubicados en el Caribe y Pacífico colombiano (González, 1987;

Andrade, 1992; Molares, Vanegas, Bustamante y Andrade, 2004; Bastidas, 2011; Grisales, Salgado y Molares, 2014; Monroy y Zambrano, 2017; Casanova, Zambrano, Latandret, Guerrero, Suárez y Albán, 2019). Para este fin se han realizado diferentes campañas oceanográficas y desarrollado proyectos de investigación que han contribuido al conocimiento y entendimiento de la dinámica marítima de las aguas territoriales de Colombia (Rueda, 2017; Dagua, Torres y Monroy, 2018; Moreno y Báez, 2021).

En el año 2006 la Dimar inició la implementación de un sistema de monitoreo en campo de las condiciones meteorológicas y oceanográficas de las costas colombianas, con el proyecto denominado Red de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (RedMpomm), el cual cuenta con estaciones meteorológicas, mareógrafos y boyas de oleaje para las costas del Pacífico y del Caribe colombianos. Este sistema ofrece soporte a las actividades marítimas y proporciona información de las condiciones *in situ* en tiempo presente.

Adicional a la información recopilada por la Dimar, diferentes autores han centrado su atención en el oleaje para fines de construcción, ampliación y adecuación de estructuras portuarias, que permitan mejorar el flujo de transporte marítimo y fluvial necesarias para el engranaje logístico, empleando datos visuales e instrumentales (Agudelo, Restrepo, Molares, Torres y Osorio, 2005), bases de datos satelitales (Thomas, Nicolae y Posada, 2012), así como modelación numérica y datos de reanálisis (Mesa-García, 2009; Osorio, Mesa, Bernal y Montoya, 2009; Vega, Álvarez, Restrepo, Ortiz y Otero, 2020; Orejarena, Restrepo, Correa y Orfila, 2022).

De igual forma, desde hace más de una década, en Colombia se han realizado estudios puntuales en los cuales se ha evaluado el potencial energético del oleaje. Este es el caso de Isla Fuerte, localizado frente a las costas de Córdoba (Ortega, Osorio y Agudelo, 2013), el norte de la península de La Guajira y en Bocas de Ceniza en Barranquilla (Torres y Andrade, 2006). Así como para todo el mar Caribe, con especial interés en la zona del *Low Level Jet* del Caribe (Appendini, Urbano, Figueroa, Dagua, Torres-Freyermuth, Salles, 2015), identificando que, desde el golfo de México hasta el mar Caribe, en el litoral colombiano se encuentra las zonas más energéticas.

La energía oceánica tiene un papel clave en el desarrollo sostenible de las regiones costeras; ya que al integrarse a las redes de energía local logra suministrar, además de electricidad, servicios como agua (a partir de la desalinización del agua de mar) y alimentar el transporte eléctrico (Shadman *et al.*, 2023). Colombia está avanzando en una transición energética que lleve al país hacia una economía verde (DNP, 2023), respaldada por el Plan Nacional del Desarrollo (PND) 2023-2026 y el Consejo Nacional de Política Económica y Social Bioceánico (Conpes 3990) (DNP, 2020), la cual contribuye al desarrollo sostenible del país, mediante el aprovechamiento integral y sostenible de su ubicación estratégica, condiciones oceánicas y recursos naturales. Diversificar la matriz energética en el país requiere de un amplio conocimiento del recurso. Por tal motivo, y con el fin de estudiar el clima marítimo del Caribe colombiano y conocer su potencial energético,

el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) en el año 2011 generó series de tiempo sintéticas de oleaje continuas, utilizando un modelo numérico espectral de oleaje de tercera generación.

El *hindcast* implementado hizo uso del modelo SWAN (Simulating Wave Nearshore) (Booji *et al.*, 2004), el cual está basado en la conservación de acción de energía de ondas y los vientos del proyecto Reanálisis Regional de América del Norte (NARR) (Messinger, DiMego, Kalnay, Mitchell, Shafran y Ebisunaki 2006), desde 1979 hasta 2010. El modelo fue calibrado y validado a partir de los datos disponibles de la RedMpomm y se verificó que el modelo reprodujera de manera adecuada las mediciones (Dagua, Lonin, Urbano y Orfila, 2013). En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo realizar la caracterización del régimen de oleaje del Caribe colombiano a partir de la información generada y calcular su potencial energético. El trabajo se ha dividido en clima marítimo y el potencial de energía; el primero abarca las aguas jurisdiccionales de Colombia en el mar Caribe y el segundo corresponde a los puntos específicos en cercanías de las capitánías.

ÁREA DE ESTUDIO

El mar Caribe inicia en la península de Yucatán y abarca hasta Panamá, limita al este con las Antillas Menores y al norte con las Antillas Mayores, terminando en la isla de Cuba. El viento predominante durante casi todo el año proviene del este (conocidos como vientos Alisios) (Vernette, 1985; Nystuen y Andrade, 1993) y es frecuentemente afectado por ondas tropicales, principalmente entre mayo y noviembre (Sosa y Hernández, 2002). Además, está afectado por fenómenos meteorológicos de escala global como la Oscilación del Atlántico Norte y la Oscilación del Sur (Poveda, 1998; Amador, 2008).

Se identifican dos épocas climáticas, una época seca entre diciembre y febrero, con valores más altos de altura de ola, y la época húmeda, entre septiembre y noviembre, donde disminuye la altura de ola. Adicionalmente, se tiene la presencia del Veranillo de San Juan (Bernal, Poveda, Roldán, Andrade, 2006) o de transición, entre junio y agosto, con un pico de aumento de altura de ola en julio, que va disminuyendo hasta debilitarse en la época húmeda. El área de

estudio se encuentra enmarcada dentro de aguas jurisdiccionales de Colombia en el mar Caribe, para las cuales se seleccionó el punto de aguas intermedias que varían entre 125 m y 250 m, más cercano a los principales puertos de la costa Caribe.

METODOLOGÍA

Para establecer los parámetros característicos del oleaje y su afectación en la región es indispensable conocer su evolución espacio-temporal con series de tiempo suficientemente largas, para lo cual se tomó la base de datos de 30 años de simulación de oleaje del CIOH. Su dominio

en el mar Caribe está entre latitudes 8° N y 18.7° N, y las longitudes 84.5° W y 59.4° W (Fig. 1), con una resolución espacial de 12 km y temporal cada hora. Las variables de salida corresponden a los parámetros integrales del oleaje en cada nodo: altura significativa (Hs), período pico (Tp) y dirección predominante (Dir). Los datos fueron validados y calibrados con información medida de boyas de la Dimar y la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA), dado que los datos obtenidos numéricamente presentan desviaciones con respecto a los datos instrumentales (Dagua *et al.*, 2013), siendo así necesario ajustar las parametrizaciones del modelo.

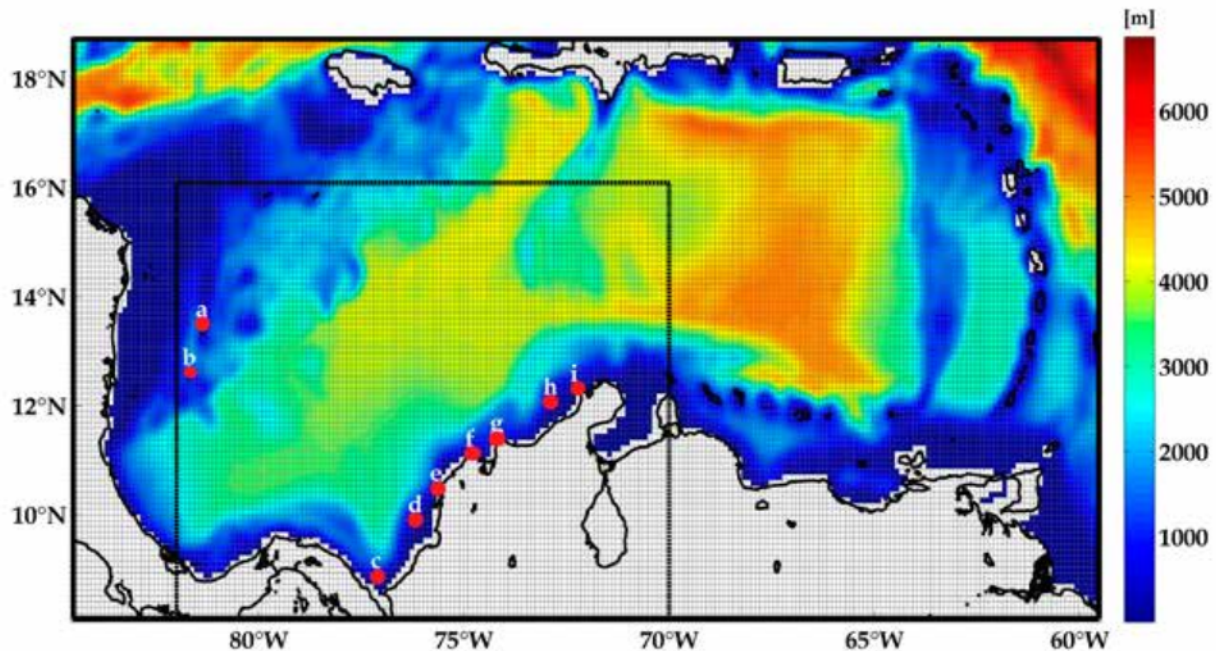


Figura 1. Dominio computacional de la modelación de oleaje. Área de estudio de clima marítimo (--) con la localización (puntos rojos) de las boyas virtuales: Providencia (a), San Andrés Isla (b), Urabá (c), Coveñas (d), Cartagena (e), Barranquilla (f), Santa Marta (g), Riohacha (h) y Puerto Bolívar (i).

Los datos usados para el forzamiento del modelo SWAN fueron: batimetría de ETOPO1 (Amante y Eakins, 2009) y vientos del reanálisis NARR (1979-2010), obtenidos del modelo Eta de la *National Center of Environmental Prediction (NCEP)*; se empleó el viento con las componentes zonal y meridional a 10 m de altura, con un paso de tiempo cada tres horas y una resolución espacial de 32 km.

Para el análisis del clima marítimo se seleccionó un subdominio (Fig. 1, línea punteada) entre latitudes 8° N y 16° N, y longitudes 84° W y 70° W, asociado a las aguas jurisdiccionales de Colombia y se seleccionaron nueve nodos como boyas virtuales, ubicadas en un radio de 80 km de los principales puertos colombianos (Tabla 1).

Tabla 1. Coordenadas de las boyas virtuales del modelo SWAN.

ID.	Región	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Profundidad (m)
a	Providencia	13°31.98'	81° 19.98'	125
b	San Andrés	12° 38.82'	81° 40.38'	500
c	Urabá	08° 55.44'	77° 03.60'	250
d	Coveñas	09° 56.76'	76° 10.14'	250
e	Cartagena	10° 31.38'	75° 37.68'	250
f	Barranquilla	11° 09.66'	74° 45.60'	125
g	Santa Marta	11° 26.58'	74° 10.08'	250
h	Riohacha	12° 06.30'	72° 52.26'	250
i	Puerto Bolívar	12° 21.06'	72° 13.08'	125

Clima de oleaje

Las condiciones medias y extremales de las variables del estado de mar fueron calculadas mediante un análisis estadístico de los parámetros integrales para la región de estudio. Las condiciones medias se obtuvieron con el promedio temporal de cada serie de Hs y Tp para todos los nodos de la región de estudio. La estimación de la probabilidad de la función de densidad conjunta se realizó mediante histogramas de altura y período en direcciones específicas, proporcionando información mensual sobre los valores de propagación en cada período de oleaje en una dirección determinada.

Para el régimen extremal, aunque no existe un único criterio que permita determinar las condiciones del oleaje; se ha observado que las distribuciones que consideran dos o tres parámetros son más adecuadas (Ruiz *et al.*, 2009). La distribución usada corresponde al método de Picos sobre el Umbral (POT: *Peaks Over Threshold*), de acuerdo con la metodología de Cañelas, Orfila, Méndez, Gómez-Pujol y Tintoré (2007). En los sitios asociados a las boyas virtuales cercanas a las capitanías de puerto se elaboraron rosas de oleaje con el fin de proporcionar la dirección predominante y la altura de ola asociada.

Cálculo del potencial de energía

Para realizar el cálculo del potencial de la energía utilizando los parámetros integrales del oleaje se realizó un ajuste sobre el periodo (Booji *et al.*, 2004) modelado en el análisis histórico de los 30 años de oleaje, el cual corresponde a:

$$T_{m,p-1,p} = 2\pi \frac{\iint \omega^{p-1} E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint \omega^p E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde,

$p = 0.5$ y $E = (\omega, \theta)$	es la varianza de la densidad de energía espectral.
ω	es la frecuencia absoluta determinada por el cambio de la relación de dispersión, teniendo en cuenta el efecto de Doppler y la dirección θ de la ola.

Dado que el flujo de energía P está en función de la altura significativa de la ola (Vicinanza, Constetabile y Ferrante, 2013; Akpinar y Kömürçü, 2012; Rusu y Guedes, 2012; Aydogan, Ayat y Yüksel, 2013), el significado del período energía está asociado a una onda sinusoidal con la misma energía del estado del mar. Por esta razón, el período de energía es el parámetro de periodo usado para la estimación de energía de las olas en aguas profundas:

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e}{64\pi} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde,

ρ	es la densidad del agua de mar.
--------	---------------------------------

Ahora, T_e en el modelo SWAN (Booji *et al.*, 2004) corresponde a otra definición del período de ola, en el sentido del factor de ponderación de la energía espectral en el espacio de fase:

$$RT_{m-10} = 2\pi \frac{\iint \sigma^{-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde,

$E = (\sigma, \theta)$	es la densidad de energía espectral.
σ	es la frecuencia relativa de la onda y la dirección θ de la ola.

Basados en la metodología descrita por (Cahill y Lewis, 2014), los cuales estiman la relación entre T_e y el período de cruce por cero T_{02} para un espectro Bretschneider y JONSWAP, este último representa de manera más adecuada el oleaje en el Caribe con una constante α (Torres y Lonin, 2007).

$$T_e = \alpha T_{02} \quad (\text{Ec.4})$$

De acuerdo con los momentos espectrales la ecuación 4 se puede escribir como:

$$\frac{m_{-1}}{m_0} = \alpha \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (\text{Ec.5})$$

Reorganizando esta ecuación en términos de H_{m0} , frecuencia pico f_p y el parámetro de forma pico, haciendo las respectivas sustituciones y simplificaciones, se permite reescribir el término α en función de γ :

$$\alpha = \left(\frac{4.2+\gamma}{5+\gamma}\right) \cdot \left(\frac{11+\gamma}{5+\gamma}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.6})$$

Ahora, los valores de la constante pueden variar de acuerdo con el parámetro de ajuste del pico del espectro γ , como se sintetiza en la Tabla 2.

Tabla 2. Relación del período de la ola para el espectro JONSWAP (Cahill y Lewis, 2014).

α	γ
1	1.22
2	1.20
3.3	1.18
5	1.16
7	1.14
10	1.12

La sensibilidad de α a la forma del espectro indica que la relación es transitoria y que los valores pueden fluctuar significativamente en un sitio, dependiendo de las condiciones y la composición de los espectros de onda; por lo tanto, no se puede generalizar la constante si no es corroborada con información local y una serie de datos suficientemente larga.

Para realizar el ajuste entre T y T_e se calculó la correlación entre las dos variables. Para este fin se simuló un año de propagación de oleaje, donde el modelo se configuró para que calcule las dos variables. Se supone que en un lapso de un año la correlación entre estas dos variables es estadísticamente representativa para las condiciones climatológicas del Caribe.

Del año simulado se extrajo la serie de tiempo para un nodo ubicado al este de Bocas de Ceniza, siendo esta una zona de fuerte oleaje (-74.76° W y 11.16° N) y se hizo la respectiva correlación (Fig. 2) entre las variables T y T_e .

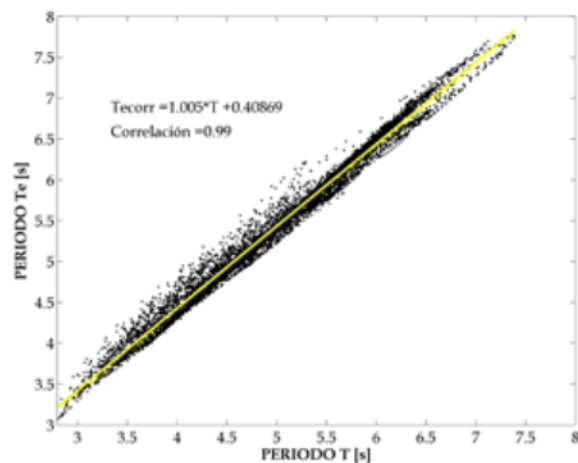


Figura 2. Correlación entre las variables T y T_e modeladas

La correlación es de 0.99; sin embargo, se realizó el ajuste para mediante la siguiente ecuación, obtenida de la recta de mejor ajuste, donde es el período de energía calculado:

$$T_{ec} = 1.005 * T + 0.4087 \quad (\text{Ec.7})$$

Se reemplazó y calculó el período T_{ec} , este ajuste se aplicó al periodo de energía para las nueve boyas virtuales y se reemplazó en la ecuación 2 para obtener el potencial de energía. El valor de la constante α para el ajuste de los períodos está subestimado de los calculados en la Tabla 2. Esto se debe a que la ecuación de período para realizar los cálculos por Cahill y Lewis (2014) es el período de cruce por cero (0), diferente al promedio de periodo absoluto usado para este caso en el modelo SWAN.

Sistemas convertidores de energía del oleaje

Se utilizaron los puntos de la Tabla 1 para la elección de un dispositivo que permita captar la energía undimotriz del Caribe colombiano en la zona de influencia de los puertos. Debido a que las profundidades oscilan entre 125 m y 250 m, la tecnología que puede utilizarse es la denominada *offshore* (sistemas montados en profundidades superiores a 40 m) (Rodríguez-Abal, 2019; Pozos,

2019) o explorar una combinación con tecnología nearshore (sistemas montados en profundidades entre 20 m y 30 m).

A continuación, se presentan algunas opciones de dispositivos de extracción de energía undimotriz (WEC: *wave energy converter*) que podrían ser utilizados para aprovechar el recurso, teniendo en cuenta su matriz de potencia (diagrama de información energética bajo ciertas condiciones de oleaje). Esto permite identificar los valores máximos de potencia generados por un instrumento y conocer su óptimo funcionamiento:

- Dispositivo Pelamis: es versátil y puede adaptarse a una variedad de condiciones de profundidad (sistema de captación de energía por oleaje tipo *offshore*). Está formado por una estructura cilíndrica, dividida en varias secciones que se ubica de forma semisumergida; su forma le permite contar con dos grados de libertad, brindándole movilidad de manera horizontal y vertical. El movimiento relativo entre las partes articuladas acciona un sistema hidráulico que alimenta un depósito a presión que, a su vez, actúa sobre un generador eléctrico y permite la captación de energía (Rodríguez-Abal, 2019; Vergaray, 2008). La orientación y forma permiten que la generación de energía se maximice cuando el oleaje es bajo. La Tabla 3 presenta la matriz de potencia propia del equipo.

Tabla 3. Matriz de potencia Pelamis. Fuente: Rodríguez-Abal (2019).

		Periodo energético (s)																	
		5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	
Altura de ola significativa (m)	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	1	-	22	29	34	37	38	38	37	35	32	39	26	23	21	-	-	-	
	1.5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2.5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3.5	-	270	254	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4	-	-	465	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4.5	-	-	544	635	642	648	628	590	582	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5.5	-	-	-	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6.5	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7.5	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Dispositivo OSWEC (sistema de captación de energía por oleaje tipo nearshore). Va anclado al fondo marino, por tanto, sus profundidades no superan los 30 m y se ubica a un 1 km de distancia (Morales, 2016). El sistema consta de una paleta principal que recibe el impacto por el oleaje, sus dimensiones dependen de la batimetría de la zona donde se instala el equipo, la paleta se monta

sobre un pivote lo que le permite un movimiento tipo péndulo, generado por la interacción con las olas, capturando la energía transportada para accionar un conjunto de pistones que entregan agua a presión a la unidad transformadora de energía. La Tabla 4 presenta la matriz de potencia propia del dispositivo.

Tabla 4. Matriz de potencia OSWEC (Equipo OYSTER 800). Fuente: Rodríguez-Abal (2019).

		Periodo energético (s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Altura de ola significativa (m)	1	27	39	57	76	87	104	109	100	101	92	94	94	87
	1.5	63	92	126	168	201	213	201	239	207	198	183	150	154
	2	75	160	233	301	380	408	383	399	239	365	319	265	259
	2.5	-	254	378	467	568	623	616	601	519	523	481	390	428
	3	-	368	503	693	799	824	876	792	759	704	546	579	554
	3.5	-	-	655	934	1032	1085	1241	1075	973	925	862	747	688
	4	-	-	843	1093	1352	1427	1430	1390	1158	1224	1139	1138	863
	4.5	-	-	1219	1408	1644	1677	1807	1641	1662	1562	1404	1370	1191
	5	-	-	1247	1670	1965	1952	2097	2002	1833	1798	1814	1459	1442
	5.5	-	-	-	1979	2339	2308	2115	2389	2120	2012	1940	1518	1587
	6	-	-	-	2406	2713	2776	2344	2705	2451	2396	2182	2414	2133
	6.5	-	-	-	2778	3044	3001	2989	3211	2986	2896	2716	2455	2309
	7	-	-	-	2871	3119	3131	3127	3176	3332	2877	2925	2676	2658

De acuerdo con lo anterior, para conocer el valor de energía que se puede generar con los sistemas WEC (Wave Energy Converter) es necesario definir correctamente los valores de periodo de energía y altura significativa de la ola para utilizar la matriz de potencia del instrumento. La matriz de potencia define el valor umbral para activar el sistema y, a su vez, entrega la potencia efectiva, dependiendo de las características del oleaje.

El rendimiento del dispositivo se mide mediante el factor de planta y corresponde a la razón entre la potencia efectiva y la potencia nominal del equipo, con esta relación es posible conocer el valor porcentual de energía que entrega un equipo WEC.

$$\text{Factor potencia} = \frac{\text{potencia efectiva generada}}{\text{potencia nominal}} \times 100 \quad (\text{Ec.8})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del cálculo del régimen medio de oleaje de aguas profundas para el mar Caribe colombiano (Fig. 3a) se evidencia cómo el oleaje está directamente influenciado por el viento (Fig. 3c), donde el patrón de los máximos del oleaje y el

viento se concentran alrededor del meridiano 75° W con 12° N, al norte de las costas colombianas, como resultado de los vientos del *Low Level Jet* del Caribe, de acuerdo con lo presentado por otros autores (Appendini *et al.*, 2015; Wang y Lee, 2007). Los valores máximos del promedio de Hs oscilan alrededor de los 2 m, con velocidades del viento de 8 m/s.

El comportamiento del periodo pico (Fig. 3b) se caracteriza por un incremento de este a oeste asociado al *fetch*, oscilando entre 6 s y 8 s. A pesar de que los vientos sobre el Caribe no son uniformes (Fig. 3c), las olas de mar de viento (sea) aumentan su periodo dependiendo del *fetch*.

De la Figura 3c los valores de vientos moderados de U = 4 m/s (fuera del máximo de La Guajira) fueron usados en la fórmula de Van Rijn (1994). El periodo pico se define como $T_p = 0.286F^{*0.33}U/g$, donde g es la gravedad y F* es el *fetch* adimensional ($=gF/U^2$). De esta forma se obtiene que para alcanzar los periodos pico de 8 s (Fig. 3b) se requiere un *fetch* de 546 km. Esto coincide con la distancia entre los vientos máximos (superiores a 4 m/s) y el istmo de Panamá. Es importante mencionar que la altura

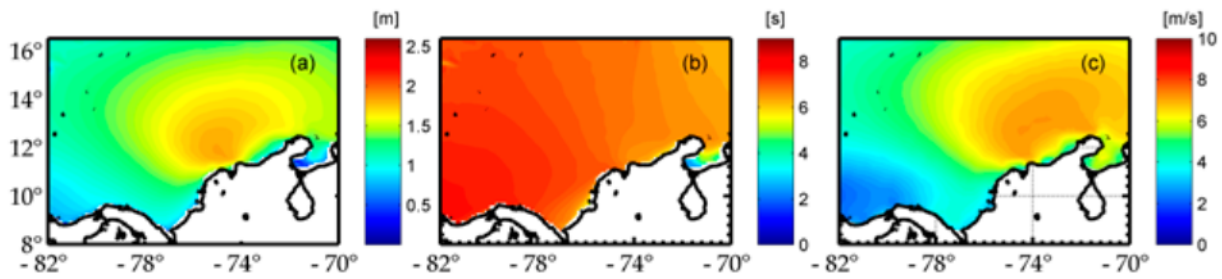


Figura 3. Valores medios calculados con la base de datos de 30 años de datos de reanálisis del CIOH: altura significativa de la ola **(a)**, periodo pico **(b)** y velocidad del viento del reanálisis NARR.

de ola también depende del *fetch*, pero para el área de máximo de viento la distribución de olas de mar de viento depende de su intensidad de mayor medida (figuras 3a y 3c).

Clima de oleaje en el Caribe colombiano

El régimen medio permite caracterizar el comportamiento del oleaje que en promedio afectará a la costa. En la Figura 4 se muestra el comportamiento medio de la altura de ola significativa para cada mes del año. Esta información es indispensable para estudios de obras marítimas, teniendo en cuenta que para

un sitio cercano a la costa es necesario propagar el oleaje de aguas profundas hasta el punto de interés.

De la Figura 4 se puede observar que el comportamiento del oleaje en la zona de estudio y a lo largo del año está fuertemente influenciado por el *Low Level Jet* del caribe y la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Así, durante los meses de diciembre a marzo, cuando se presenta la época seca, la ZCIT se encuentra más hacia el sur, los vientos Alisios son más intensos y la altura de la ola es mayor comparada con el resto del año.

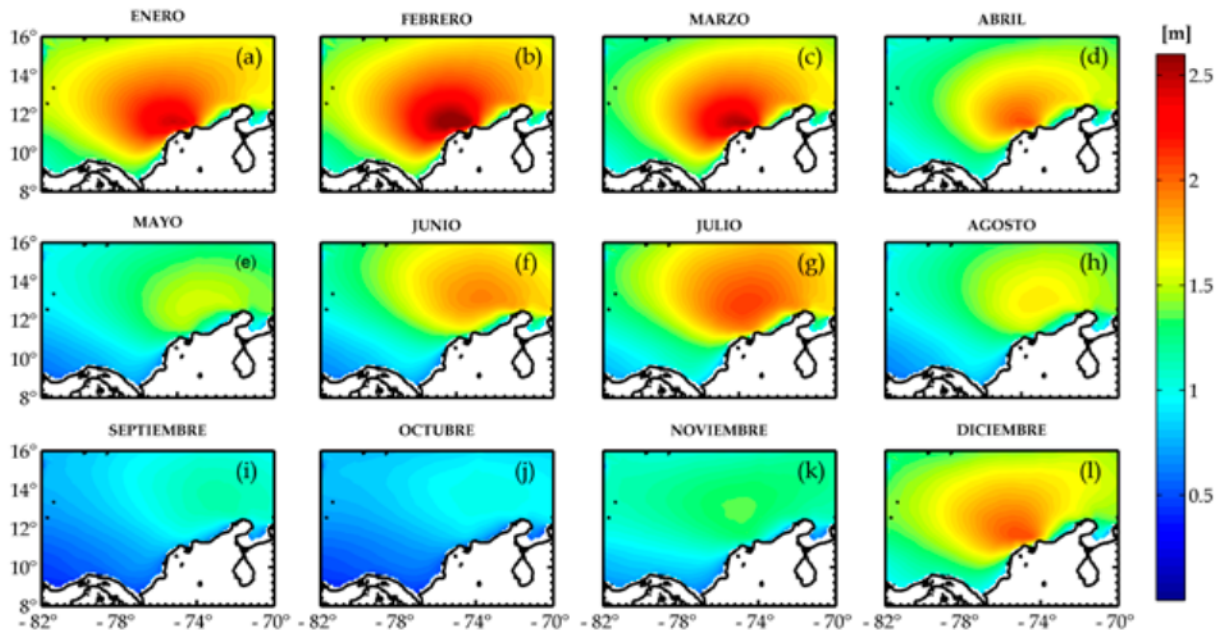


Figura 4. Medias mensuales de altura de ola significativa, con base en la información de reanálisis generado en el CIOH.

Caso contrario ocurre durante los meses de septiembre a noviembre, cuando se presenta la época húmeda y la ZCIT está más al norte (Pujos y Mesa, 1988; Mesa, Poveda y Carvajal, 1997; Bernal *et al.*, 2006). Igualmente, la Figura 4g (julio) evidencia la influencia del veranillo de San Juan, con el incremento de la altura de la ola respecto a los meses de junio y agosto (figuras 4f y 4h).

Estos resultados concuerdan con los resultados presentados por Mesa-García (2009), quien

expone que, además de la variabilidad espacial, el oleaje en la región posee una variación temporal que se manifiesta en la variabilidad en la magnitud de la altura significativa de ola en los distintos períodos del año.

Con el fin de conocer detalladamente el comportamiento del oleaje y su dirección predominante en cercanías a los principales puertos del país, se generaron las rosas de oleaje en los puntos de ubicación de las boyas virtuales indicadas en la Tabla 1 (Fig. 5).

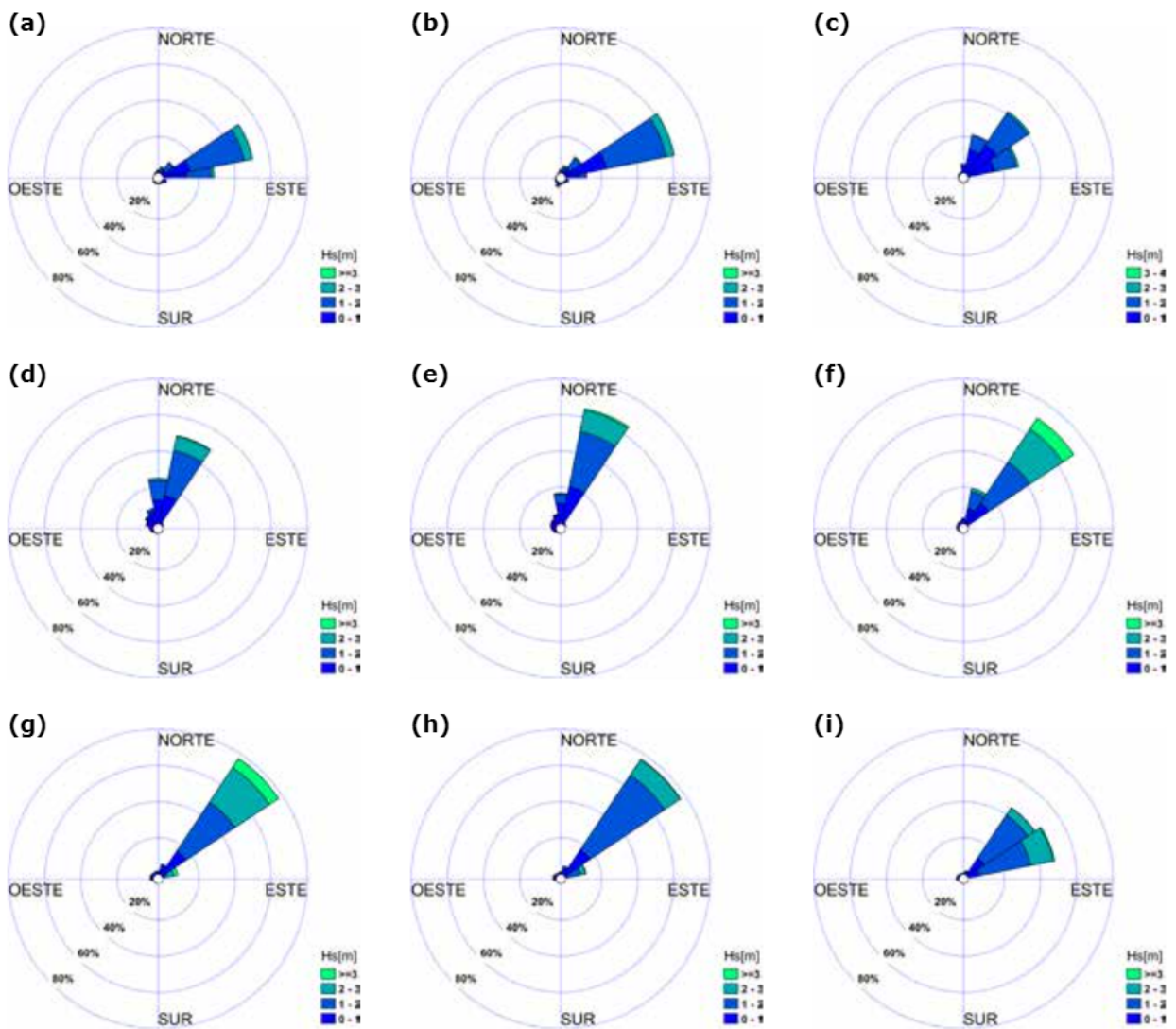


Figura 5. Rosas de oleaje para los nodos de estudio, con altura de ola asociada (el color indica la magnitud de Hs. Providencia **(a)**, San Andrés **(b)**, Urabá **(c)**, Coveñas **(d)**, Cartagena **(e)**, Barranquilla **(f)**, Santa Marta **(g)**, Riohacha **(h)**, Puerto Bolívar **(i)**.

Para todos los casos estudiados, se observa que predominan las direcciones de oleaje en el cuadrante noreste (NE). Este comportamiento concuerda con la climatología de vientos en el Caribe descrita en (Verette, 1985; Nystuen y Andrade, 1993), confirmando una clara influencia de los vientos Alisios en la región.

Los parámetros básicos de cada boya virtual se presentan en la Tabla 5, la cual muestra la

dirección predominante y el tiempo que presenta en términos de porcentaje, el valor de altura de ola significativa que no es superado el 50 % y 99 % del tiempo en cada caso. Se observa que el valor máximo de altura de ola está en Barranquilla y el menor se presenta en Urabá, tanto para el 50 %, como para el 99 % del tiempo, lo cual se corrobora tanto en el régimen medio calculado (Fig. 3) como en las medias mensuales (Fig. 4).

Tabla 5. Descripción de la dirección predominante y altura de ola para cada boya virtual.

Boya virtual	Dirección	Probabilidad-Dirección (%)	Hs50%	Hs99%
Providencia	NEE	50.60	1.275	2.613
San Andrés	NEE	61.24	1.174	2.542
Urabá	NE	41.45	1.047	2.290
Coveñas	NNE	49.63	1.311	3.044
Cartagena	NNE	64.82	1.338	3.104
Barranquilla	NE	70.69	1.777	3.953
Santa Marta	NE	77.32	1.700	3.770
Riohacha	NE	76.92	1.419	2.754
Pto. Bolívar	NEE	48.77	1.677	3.067

En la Figura 6 se presentan los resultados del régimen extremal, con diferentes periodos de retorno.

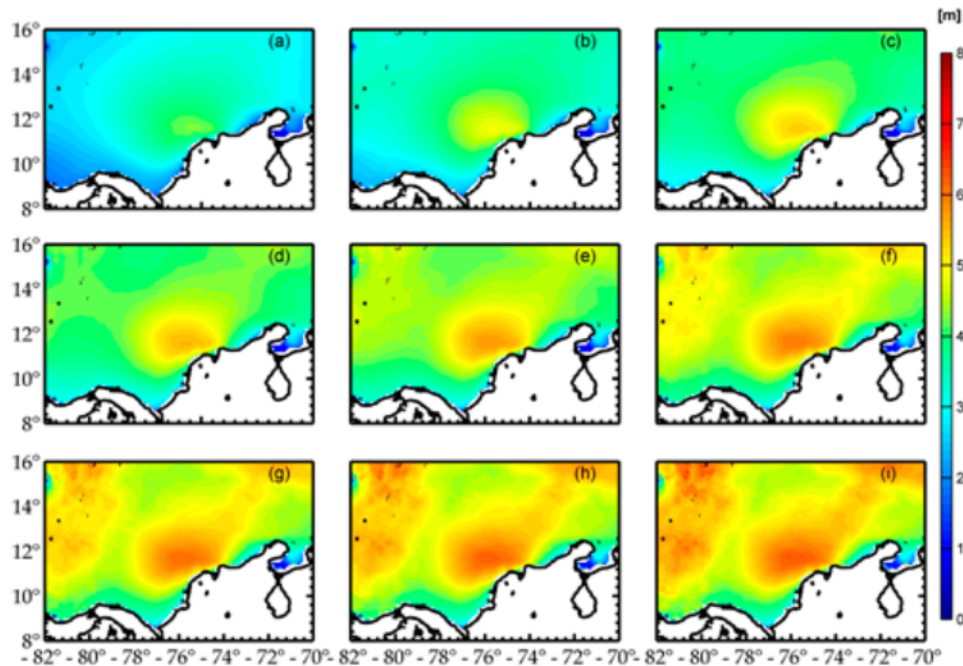


Figura 6. Ajuste del régimen extremal para aguas profundas de la zona de estudio. Altura de ola del umbral de cálculo al 99 % (a), periodo de retorno de 1 año (b), periodo de retorno de 3 años (c), periodo de retorno de 5 años (d), periodo de retorno de 10 años (e), periodo de retorno de 20 años (f), periodo de retorno de 30 años (g), periodo de retorno de 50 años (h), periodo de retorno de 100 años (i).

El oleaje asociado a eventos extremos tiene alturas de ola menores para la región de Urabá en la zona más austral del mar Caribe, así como en Coveñas, que, dada su posición, se encontrarían menos expuestos de los temporales más fuertes provenientes del este. Las regiones de Providencia y San Andrés presentan valores altos de oleaje en los diferentes períodos de retorno, pero los valores de altura de ola extremal más altos se presentan en aguas profundas de las regiones de Barranquilla y Santa Marta, con alturas de ola asociadas de alrededor de 6 m.

Aunque los resultados expuestos en este estudio concuerdan con los valores medios de altura y dirección predominante expuestos por otros autores (Agudelo *et al.*, 2005; Osorio *et al.*, 2009; Thomas, Nicolae, Durand, Posada, García y Andrade 2011), los valores extremos difieren para diferentes períodos de retorno y regiones. Esto se atribuye a que las bases de datos utilizadas son diferentes (datos de buques en ruta o de altimetría satelital), así como las metodologías empleadas para su cálculo (máximo anual, GEV, POT).

En este sentido, está claro que la estadística del oleaje (mediante el reanálisis de vientos) debe reflejar mejor estos valores en comparación con las observaciones de barcos en ruta: (i) debido a los errores de observación visual y experiencia subjetiva; (ii) por presentarse en distintas localidades con la necesidad de agrupar los datos en una malla; (iii) por evitar adversos fenómenos severos, como ciclones tropicales, en las rutas de embarcaciones.

Potencial de energía del oleaje para puntos cercanos a las capitanías

Usando las expresiones para el cálculo de la potencia descritas en la metodología, se obtuvieron gráficas combinadas de la dispersión con los diagramas de energía en términos H_s y T_e (Fig. 7). Estas describen el potencial de energía promedio de un año, para intervalos de 0.25 m y 0.25 s, respectivamente.

De acuerdo con estos resultados, el potencial de energía se concentra entre 4 s y 6 s y entre 0.5 m y 3 m, similar a lo reportado por Appendini *et al.* (2015) para las boyas de Barranquilla,

Puerto Bolívar y Providencia. El potencial más alto se observa en la boya de Barranquilla, entre 7 s y 4 m; seguido de Santa Marta, entre 6 s y 3.8 m, esto teniendo en cuenta que las líneas de potencia varían de acuerdo con el período y la altura de ola.

Cabe anotar que los valores de frecuencia son bajos, teniendo en cuenta que la barra de colores establece la proporción tiempo (en horas) que se dispone o genera cierta cantidad de megavatios, calculado para un año medio. Por lo cual, si bien el potencial máximo de Barranquilla está alrededor de 50 kW/m, este solo generará por año menos de 0.1 MWh. Finalmente, para establecer las condiciones más favorables del flujo de energía se calculó la variabilidad estacional del potencial, con el promedio anual para cada boya virtual (Fig. 8).

De manera general, se observa en el ciclo anual valores altos de potencial de energía de diciembre a marzo, y los valores más bajos en mayo, y entre septiembre a noviembre, meses que corresponden a las épocas seca y húmeda, respectivamente (Bernal *et al.*, 2006). Pero adicionalmente, se tiene un incremento en julio, relacionado con el veranillo de San Juan o de transición (Andrade y Barton, 2000; Curtis y Gamble, 2007).

Al igual que en los diagramas de energía potencial, las boyas virtuales de Barranquilla y Santa Marta tienen los valores más altos con respecto a las demás boyas. Esto se explica debido a su ubicación geográfica cercana al *Low Level Jet* del Caribe (Appendini *et al.*, 2015; Ruiz y Bernal, 2009; Bernal, Ruiz y Beier, 2010; Andrade y Barton, 2005). Este afecta al oleaje tal y como se registra en el patrón del valor medio de altura significativa de la ola (Fig. 3) y se revalida en su variabilidad mensual (Fig. 4).

Potencial efectivo calculado para los puntos cercanos a las capitanías

Según el estudio, los puntos con un mayor potencial se ubican en Barranquilla y Santa Marta, donde se podrían obtener entre 55 Kw/m y 43 Kw/m, respectivamente. Sin embargo, este no es el potencial real que se alcanza con los sistemas WEC.

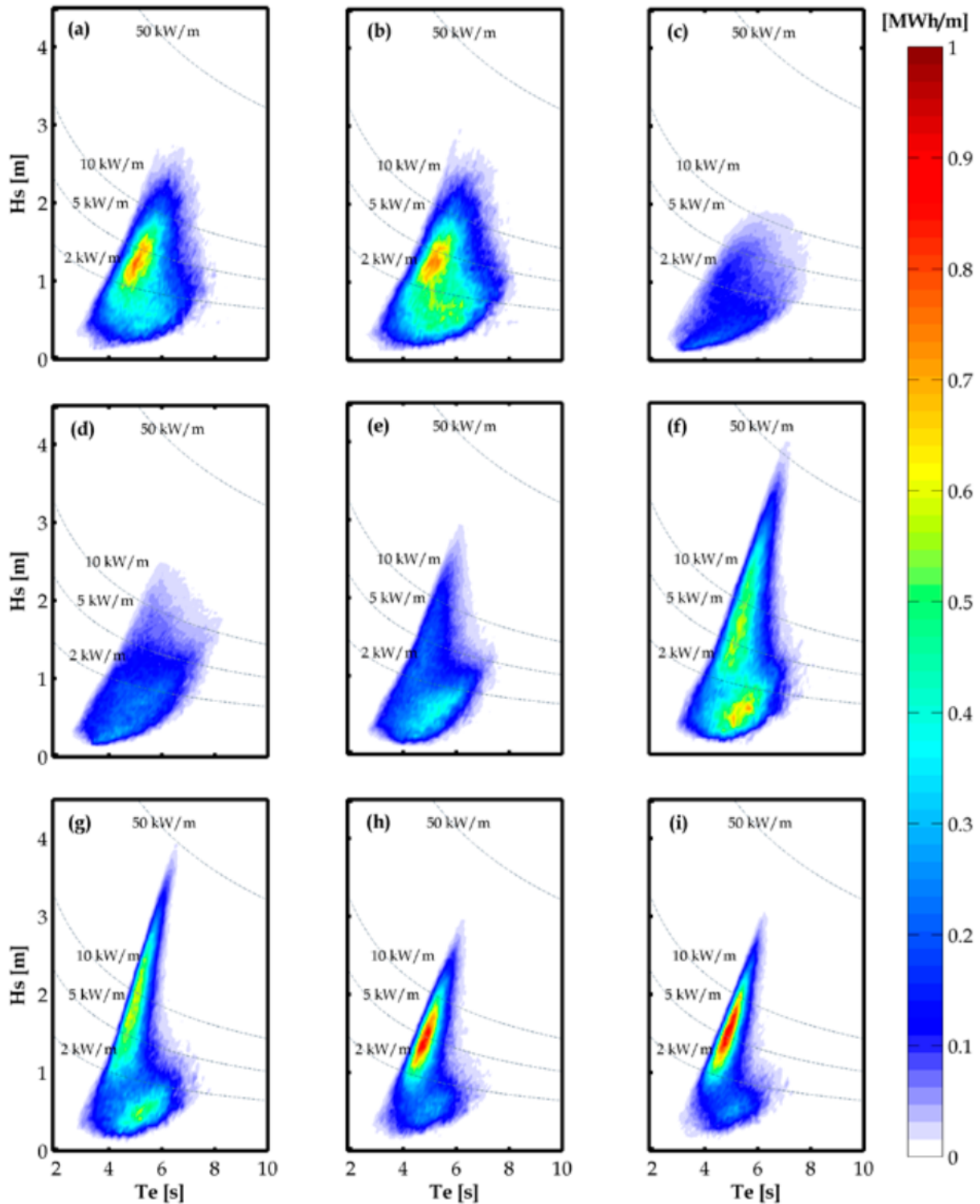


Figura 7. Diagramas de energía y dispersión en términos de H_s y T_e para las boyas virtuales de: Providencia **(a)**, San Andrés **(b)**, Urabá **(c)**, Coveñas **(d)**, Cartagena **(e)**, Barranquilla **(f)**, Santa Marta **(g)**, Riohacha **(h)**, Puerto Bolívar **(i)**. La línea punteada indica el potencial de energía (por metro de frente de ola) y los colores la potencia por unidad de tiempo.

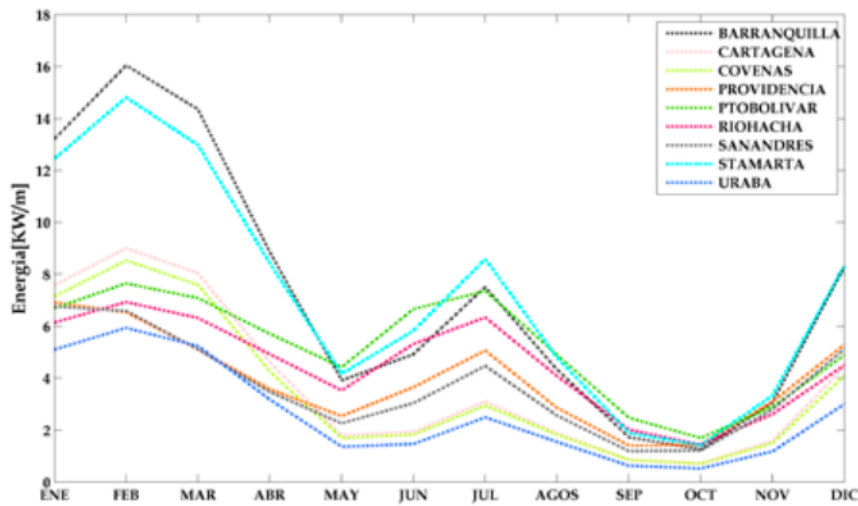


Figura 8. Promedio anual de potencial de energía para las boyas virtuales de Providencia, San Andrés, Urabá, Coveñas, Cartagena, Barranquilla, Santa Marta, Riohacha y Puerto Bolívar.

Considerando las características de oleaje de la Figura 7, se pueden definir intervalos de Hs y periodos de energía que se mantienen a lo largo del año. Con esta información se calculó la potencia real (potencia efectiva) generada con los instrumentos Pelamis y Oyster, antes descritos, para cada una de las zonas de estudio. Aparte del potencial real es posible generar el factor de planta y definir los porcentajes en que se aprovecharía

cada instrumento (Ecu. 8). Las tablas 6, 7, 8 y 9 presentan el rendimiento de los instrumentos Pelamis y Oyster para las zonas de Barranquilla y Santa Marta, en las cuales las variaciones de color (gris-menor a rojo-mayor) reflejan la transición de los valores de potencia y rendimiento para cada una de las tecnologías consideradas, en función de las condiciones de oleaje.

Tabla 6. Matriz de potencia y factor de planta para Barranquilla con tecnología Pelamis.

		Matriz Potencia Generada Barranquilla							
		Periodo (s)							
		4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
Hs (m)	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	22	29	34	37	38
	1.5	-	-	32	50	65	76	83	86
	2	-	-	57	88	115	136	148	153
	2.5	-	-	89	138	180	212	231	238
	3	-	-	129	198	260	305	332	340
	3.5	-	-	-	270	254	415	438	440
	4	-	-	-	-	465	502	540	546
		Factor de Planta Barranquilla							
		Periodo (s)							
		4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
Hs (m)	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	3 %	4 %	5 %	5 %	5 %
	1.5	-	-	4 %	7 %	9 %	10 %	11 %	11 %
	2	-	-	8 %	12 %	15 %	18 %	20 %	20 %
	2.5	-	-	12 %	18 %	24 %	28 %	31 %	32 %
	3	-	-	17 %	26 %	35 %	41 %	44 %	45 %
	3.5	-	-	-	36 %	34 %	55 %	58 %	59 %
	4	-	-	-	-	62 %	67 %	72 %	73 %

Tabla 7. Matriz de potencia y factor de planta para Santa Marta con tecnología Pelamis.

		Matriz Potencia Generada Santa Marta					
		Periodo (s)					
		4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hs (m)	0.5	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	22	29	34
	1.5	-	-	32	50	65	76
	2	-	-	57	88	115	136
	2.5	-	-	89	138	180	212
	3	-	-	129	198	260	305
	3.5	-	-	-	270	254	415
	4	-	-	-	-	465	502
		Factor de Planta Santa Marta					
		Periodo (s)					
		4	4.5	5	5.5	6	6.5
Hs (m)	0.5	-	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	3 %	4 %	5 %
	1.5	-	-	4 %	7 %	9 %	10 %
	2	-	-	8 %	12 %	15 %	18 %
	2.5	-	-	12 %	18 %	24 %	28 %
	3	-	-	17 %	26 %	35 %	41 %
	3.5	-	-	-	36 %	34 %	55 %
	4	-	-	-	-	62 %	67 %

Tabla 8. Matriz de potencia y factor de planta para Barranquilla con tecnología Oyster.

		Matriz Potencia Generada Barranquilla			
		Periodo (s)			
		4	5	6	7
Hs (m)	0.5	-	-	-	-
	1	27	39	57	76
	1.5	63	92	126	168
	2	75	160	233	301
	2.5	-	254	378	465
	3	-	368	503	693
	3.5	-	-	655	934
	4	-	-	843	1093
		Factor de planta Generada Barranquilla			
		Periodo (s)			
		4	5	6	7
Hs (m)	0.5	-	-	-	-
	1	1 %	1 %	2 %	2 %
	1.5	2 %	3 %	4 %	5 %
	2	2 %	5 %	7 %	9 %
	2.5	-	8 %	11 %	14 %
	3	-	11 %	15 %	21 %
	3.5	-	-	20 %	28 %
	4	-	-	25 %	33 %

Tabla 9. Matriz de potencia y factor de planta para Santa Marta con tecnología Oyster.

Matriz Potencia Generada Santa Marta				
		Periodo (s)		
		4	5	6
Hs (m)	0.5	-	-	-
	1	27	39	57
	1.5	63	92	126
	2	75	160	233
	2.5	-	254	378
	3	-	368	503
	3.5	-	-	655
	4	-	-	843
Factor de planta Generada Santa Marta				
		Periodo (s)		
		4	5	6
Hs (m)	0.5	-	-	-
	1	1 %	1 %	2 %
	1.5	2 %	3 %	4 %
	2	2 %	5 %	7 %
	2.5	-	8 %	11 %
	3	-	11 %	15 %
	3.5	-	-	20 %
	4	-	-	25 %

En Barranquilla y Santa Marta mediante un WEC Pelamis pueden conseguirse 546 Kw/m y 502 Kw/m, respectivamente, lo que representa un rendimiento del 73 % y 67 %, considerando las condiciones máximas de oleaje. Sin embargo, estas condiciones no son constantes a lo largo del tiempo como lo muestra la Figura 7. Con valores de mayor frecuencia se tendrían potenciales entre 115 Kw/m y 88 Kw/m, que indican un rendimiento del 15 % y 12 %. La variabilidad de las condiciones hace que el sistema no mantenga una generación máxima, por ende, se deben buscar condiciones donde se logre una generación eléctrica casi invariante como lo recomienda (Rodríguez-Abal, 2019), logrando un sistema confiable, que genere la energía necesaria para atender la demanda de los usuarios.

Con un dispositivo Oyster, bajo condiciones máximas de oleaje, se consiguen potenciales eléctricos de 1093 Kw/m y 843 Kw/m para Barranquilla y Santa Marta, respectivamente, lo que al final refleja un factor de planta del 33 % y 25 %. No obstante, y como se mencionó previamente, son condiciones que no son constantes a lo largo del tiempo. Con parámetros de mayor frecuencia se tendrían potenciales de 233 Kw/m y 160 Kw/m, que indican un rendimiento

del 7 % y 5 % en las zonas mencionadas. En comparación con un sistema Pelamis, el Oyster entrega mayores potenciales eléctricos, pero el rendimiento del equipo no alcanza los porcentajes mostrados por Pelamis como consecuencia de la potencia nominal.

CONCLUSIONES

Se identificaron cuatro regiones en el Caribe colombiano con características similares de altura de ola, período y dirección. Una primera región insular correspondiente a San Andrés y Providencia; una región sur ubicada entre Urabá, Coveñas y Cartagena; una región central que corresponde a la región entre Barranquilla y Santa Marta, y una región norte, entre Riohacha y Puerto Bolívar.

Se encontró que Barranquilla y Santa Marta tienen valores de altura de ola más altos con respecto a las otras regiones, en 50 % y 99 % del tiempo y más bajos para Providencia, San Andrés, Urabá. Para el caso de regímenes extremales, los valores de altura de ola extremal más altos se presentan en aguas profundas de las regiones de Barranquilla y Santa Marta, y los más bajos en las regiones de Urabá y Coveñas.

El espectro del potencial de energía para las boyas virtuales se concentra entre 4 s a 6 s en periodo y entre 0.5 m y 3 m en alturas de ola, muy similar a lo reportado por (Appendini et al., 2015) para las boyas de Barranquilla, Puerto Bolívar y Providencia, donde el potencial más alto se observa en la boya de Barranquilla entre 7 s y 4 m, seguido de Santa Marta entre 6 s y 3.8 m.

El promedio anual de potencial de energía tiene los valores altos para los meses de diciembre a marzo, y los valores bajos en mayo, y entre septiembre a noviembre, los cuales corresponden la época seca y la época húmeda, respectivamente. La estadística y las bases de datos elaboradas en el presente trabajo proporciona información de referencia sobre el proceso de transformación de olas en aguas transitorias y someras en la zona de influencia marítima de todas las capitánías de puerto del Caribe.

En este sentido, teniendo en cuenta que la mayor parte de la investigación sobre energía de las olas en Colombia se ha centrado en caracterizar el recurso midiendo la altura y el período de las olas, se hace relevante desarrollar, optimizar y caracterizar equipos que permitan identificar la viabilidad de este tipo de tecnológicas, y el desarrollo de dispositivos para la generación de energía a partir de los recursos disponibles en el país.

De acuerdo con lo encontrado, las condiciones de oleaje superan el umbral necesario para activar un sistema WEC, con potenciales de rendimiento posiblemente aceptables, que podrían multiplicarse al montar parques de energía que involucren más de uno o dos dispositivos WEC, y considerando análisis más exhaustivos de las condiciones topográficas de zonas de instalación. Al final, la viabilidad de estos sistemas estará sujeta al factor económico, que marcará la relación costo beneficio de este tipo de tecnología categorizada como emergente.

FUENTE FINANCIADORA

El presente trabajo fue realizado con recursos propios del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) de la Dirección General Marítima (Dimar).

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, C. U.; metodología, C. U.; curación de datos: C. D., A. C.; análisis, C. U., C. D., A. C.; software: C. U., C. D., A. C.; visualización, C. U.; redacción-preparación del borrador original, C. U.; redacción-revisión y edición, C. U., C. D. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, P.; Restrepo, A.; Molares, R.; Torres, R.; Osorio, A. (2005). Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el Caribe colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 23: 33-45. <https://doi.org/10.26640/22159045.137>
- Akpınar, A.; Kömürçü, M. (2012). Wave energy potential along the south-east coast of the Black Sea. *Energy*, 42(1): 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.057>
- Amador, J. (2008). El jet de bajo nivel del mar Intraamericano. *Anales de la Academia de Ciencias de Nueva York*, 1146: 153-188. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.012> PMID:19076415
- Amante, C.; Eakins, B. (2009). *ETOPO 1 1 arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division, Boulder, Colorado: NOAA Technical Memorandum NESGIS NGDC-24.
- Andrade, C. A. (1992). Movimiento geostrofico en el Pacifico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 12: 23-38. https://doi.org/10.26640/01200542.12.23_38
- Andrade, C. A.; Barton, E. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 105(C11): 26191-26201. <https://doi.org/10.1029/2000JC000300>
- Andrade, C. A.; Barton, E. D. (2005). The Guajira upwelling system. *Continental Shelf Research*, 25(9): 1003-1022. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.12.012>
- Appendini, C.; Urbano, C.; Figueroa, B.; Dagua, C.; Torres-Freyermuth, A.; Salles, P. (2015). Wave energy potential assessment in the Caribbean Low Level Jet using. *Applied Energy*,

- 137: 375-384. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.038>
- Aydogan, B.; Ayat, B.; Yüksel, Y. (2013). Black Sea wave energy atlas from 13 years hindcasted wave data. *Renewable Energy*, 57: 436-447. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.047>
- Bastidas, G. D. (2011). Evaluación temporal de parámetros fisicoquímicos en una estación oceánica frente a la bahía de Tumaco. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 137-145. <https://doi.org/10.26640/22159045.236>
- Bernal, G.; Poveda, G.; Roldán, P.; Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115): 195-208.
- Bernal, G.; Ruiz, M.; Beier, E. (2010). Variabilidad estacional e interanual océano-atmósfera en la cuenca Colombia. *Cuadernos del Caribe*, 14: 49-72.
- Booji, N.; Haagsma, I.; Holthuijsen, L.; Kieftenburg, A.; Ris, R.; Van der Westhuisen, A., Zijlema, M. (2004). *SWAN Usermanual, CycleIII Version 40.51*. Netherlands: Delft University of Technology.
- Cahill, B.; Lewis, T. (2014). *Wave period ratios and the calculation of wave power*. Seattle: Proceedings of the 2^o Marine Energy Technology Symposium.
- Cañelas, B.; Orfila, A.; Méndez, F.; Gómez-Pujol, L.; Tintoré, J. (2007). Application of a POT model to estimate the extreme significant wave height levels around the Balearic Sea (Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research*, 50: 329-333.
- Casanova, R.; Zambrano, M.; Latandret, S.; Guerrero, D.; Suárez, N.; Albán, C. (2019). *Comportamiento espacial de algunas variables fisicoquímicas en el Pacífico colombiano durante el Crucero Oceanográfico Cuenca Pacífica Colombiana CPC XLIX*. *Bol. Cient. CIOH*, 38(1): 8-19. <https://doi.org/10.26640/22159045.2019.520>
- Curtis, S.; Gamble, D. (2007). Regional variations of the Caribbean mid-summer drought. *Theoretical and Applied Climatology*, 94: 25-34. <https://doi:10.1007/s00704-007-0342-0>
- Dagua, C.; Torres, R.; Monroy, J. (2018). Condiciones oceanográficas de la reserva de biósfera Seaflower 2014-2016. *Bol. Cient. CIOH*, 37: 53-74. <https://doi.org/10.26640/22159045.449>
- Dagua, C.; Lonin, S.; Urbano, C.; Orfila, A. (2013). Calibración del modelo SWAN y validación de reanálisis de oleaje en el Caribe. *Bol. Cient. CIOH*, 31: 13-28. <https://doi.org/10.26640/22159045.249>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). *Documento CONPES 3990 "Colombia potencia bioceánica sostenible 2030"*. Bogotá. 91 pp. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3990.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2023- 2026 "Colombia potencia mundial de la vida"*. Bogotá. 345 pp. <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/pnd-2022-2026>
- Dirección General Marítima. (2023). *Convenios OMI (Organización Marítima Internacional)*. <https://www.dimar.mil.co/Internacional/convenios-omi-organizacion-maritima-internacional-0>
- González, E. (1987). Oceanografía física descriptiva del archipiélago de San Andrés y Providencia, con base en el análisis de los cruceros Océano IV a IX. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 73-100. https://doi.org/10.26640/01200542.7.73_100
- Grisales, C.; Salgado, J.; Molares, R. (2014). Proceso de intercambio de masas de agua de la bahía de Cartagena (Caribe colombiano) basado en la medición de parámetros oceanográficos. *Bol. Cient. CIOH*, 32: 47-70. <https://doi.org/10.26640/22159045.263>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés". (Enero de 2015). *Noticias Invemar*. <https://www.invemar.org.co/50-mar#:~:text=El%20%C3%A1rea%20terrestre%20es%20de,la%20cifra%20que%20se%20use>
- Mesa-García, J. (2009). *Metodología para el reanálisis de series de oleaje para el Caribe*

- Colombiano. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Medellín, Colombia.
- Mesa, O.; Poveda, G.; Carvajal, L. (1997). *Introducción al clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Messinger, F.; DiMego, G.; Kalnay, E.; Mitchell, K.; Shafran, P.; Ebisunaki, W. (2006). North american regional reanalysis. *Bulletin American Meteorological Society*, 87: 343-360. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-3-343>
- Molares, R.; Vanegas, T.; Bustamante, J.; Andrade, C. (2004). Aspectos oceanográficos de las aguas sobre la depresión Providencia en mayo de 2004. *Bol. Cient. CIOH*, 22: 11-25. <https://doi.org/10.26640/22159045.124>
- Morales, E., (2016). *Análisis de un dispositivo oscilante como medio de captación de energía undimotriz. Tesis para optar a ingeniero civil mecánico*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/>
- Monroy, J.; Zambrano, A. (2017). Aspectos físicos del agua de mar entre las islas de Providencia y Cayo Bajo Nuevo durante la época de lluvias de 2016. *Bol. Cient. CIOH*, 35: 3-12. <https://doi.org/10.26640/22159045.428>
- Moreno, M.; Baéz, L. (2021). Expedición Seaflower: El paisaje cultural marítimo de Providencia y Santa Catalina. Resultados preliminares. *Bol. Cient. CIOH*, 40: 83-90. <https://doi.org/10.26640/22159045.2021.566>
- Nystuen, J.; Andrade, C. (1993). Tracking Mesoscale Ocean features in the Caribbean Sea using geosat altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 98(C5): 8389-8394. <https://doi.org/10.1029/93JC00125>
- Orejarena, A.; Restrepo, J.C.; Correa, A.; Orfila, A. (2022). Wave energy flux in the Caribbean Sea: Trends and variability. *Renewable Energy*, 181: 616-629. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.081>
- Ortega, S.; Osorio, A.; Agudelo, P. (2013). Estimation of the wave power resource in the Caribbean Sea in areas with scarce instrumentation Case study: Isla Fuerte, Colombia. *Renewable Energy*, 57: 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.11.038>
- Osorio, A.; Mesa, J.; Bernal, G.; Montoya, R. (2009). Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH*, 27: 37-56. <https://doi.org/10.26640/22159045.2009>
- Poveda, G. (1998). *Retroalimentación dinámica entre el Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur y la hidrología de Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/51284>
- Pujos, G.; Mesa, O. (1988). Hydrogeology of the Colombian Caribbean continental platform around the Dique Delta in the rainy season: Consequences on circulation. *Bulletin de L'Institut de Geologie du Bassin d'Aquitaine*, 44: 97-107.
- Rodríguez-Abal, D. (2019). *Estudio de áreas de implementación de sistemas undimotrices en la costa gallega*. Universidad Politécnica de Cartagena. España.
- Rueda, S. (2017). *Medidas regionales de planeamiento espacial marino para mejorar la sostenibilidad del Área Marina Protegida de Seaflower en el mar Caribe colombiano*. *Bol. Cient. CIOH*, 35: 41-62. <https://doi.org/10.26640/22159045.431>
- Ruiz, G.; Mendoza, E.; Silva, R.; Posada, G.; Pérez, D.; Rivillas, G.; Escalante, E.; Ruiz, F. (2009). Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano. *Ingeniería del Agua*, 16(1): 51-64. <https://doi.org/10.4995/ia.2009.2944>
- Ruiz, M.; Bernal, G. (2009). Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 20: 7-20.
- Rusu, L.; Guedes, C. (2012). Wave energy assessments in the Azores islands. *Renewable Energy*, 45: 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.027>
- Shadman, M.; Roldán, M.; Pierart, F.; Haim, P.; Alonso, R.; Silva, C.; Osorio, A.; Almonacid, N.; Carreras, G.; Maali, M.; Arango, S.; Rosas, M.; Pelissero, M.; Tula, R.; Estefen, S.; Lafoz, M.; Saavedra, O. (2023). A review of offshore

- renewable energy in South America: current status and future perspectives. *Sustainability*, 15(2), 1740. <https://doi.org/10.3390/su15021740>
- Sosa, M.; Hernández, A. (2002). Variación del estado de mar al paso de las ondas tropicales por el mar Caribe. *Revista de Climatología*, 2: 1-4.
- Thomas, Y.; Nicolae, A.; Durand, P.; Posada, B.; García, C.; Andrade, C. A. (2011). *Altura significativa del oleaje en la cuenca colombiana del Caribe datos de altimetría radar*. *Bol. Cient. CIOH*, 29: 27-45. <https://doi.org/10.26640/22159045.227>
- Thomas, Y.; Nicolae, A.; Posada, B. (2012). Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar)- Convenio Especial de Cooperación Colciencias. Gobernación del Magdalena.
- Torres, R.; Andrade, C. (2006). Potencial en Colombia para el aprovechamiento de la energía no convencional de los océanos. *Bol. Cient. CIOH*, 24: 11-25. <https://doi.org/10.26640/22159045.145>
- Torres, R.; Lonin, S. (2007). Estudio del espectro de oleaje en el Caribe observado con boyas y su representación en el espectro JONSWAP. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 8-18. <https://doi.org/10.26640/22159045.158>
- Van Rijn, L. C. 1994. *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans*. Aqua Publications, Delft, Holanda. 335 pp.
- Vega, M. J.; Álvarez, O.; Restrepo, J. C.; Ortiz, J. C.; Otero, L. J. (2020). Interannual variability of wave climate in the Caribbean Sea. *Ocean Dynamics*, 70: 965-976. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01377-1>
- Vergaray, J. (2008). *Generación eléctrica mediante el aprovechamiento del oleaje marítimo costero*. Universidad de Chile.
- Vernette, G. (1985). *La plateforme continentale Caraïbe du Colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme mégarégionnaire sur la morphologie et la sédimentation*. Bordeaux: These de doctorat etates Sciences present a Université de Bordeaux.
- Vicinanza, D.; Costabile, P.; Ferrante, V. (2013). Wave energy potential in the north - west of Sardinia (Italy). *Renewable Energy*, 50: 506-521. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.015>
- Wang, C.; Lee, S. (2007). Atlantic warm pool, Caribbean low-level jet, and their potential impact on Atlantic hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 34(2): 412-422. <https://doi.org/10.1029/2006GL028579>