

## El oleaje en las costas mexicanas: parámetros clave y estimación de su potencial energético

### The wave on the Mexican coast: key parameters and estimate of its energy potential

José Fernando Guillén Guzmán<sup>1</sup> \* , Martha Angélica Cano Figueroa   
& Elsa María de la Calleja Mora 

#### Resumen

La energía derivada del oleaje del mar ó energía undimotriz, es uno de los campos de investigación más relevantes en los últimos años. Es una fuente renovable, aunque no tan diseminada como la energía solar ó la eólica. México cuenta con una extensión litoral total de 11,122 kms lo cual podría representar un gran potencial de generación de energía relativamente sustentable. Un problema fundamental para la implementación de dispositivos WECs (Wave Energy Converters) ó dispositivos convertidores de energía del oleaje es precisamente la identificación de ubicaciones idóneas para optimizar la efectividad de su operación. La potencia generada por un WEC depende de diversos parámetros asociados al oleaje tales como la altura, el período, la profundidad y la frecuencia. Existe un número de parámetros adicionales tales como la velocidad y dirección del oleaje, la temperatura y la salinidad del agua, de las cuales podemos suponer una influencia relativa en la efectividad de la operación de un WEC. También se describen las diversas fuentes de información en las que es posible encontrar dichos parámetros: bases internacionales, entre las que destacan: Copernicus, NOAA y GOOS, bases de datos nacionales, como Atlas Loom y el Servicio Meteorológico Nacional de México. Finalmente, en este artículo se realiza la estimación de la energía del oleaje en treinta y tres estaciones de costas mexicanas, empleando la Teoría Lineal de Estimación de Potencia de las Olas, que se basa fundamentalmente en los parámetros de altura y período de la ola. A partir de la energía estimada, se desarrolló la geolocalización que ubica la energía de las olas asociada a cada región bajo estudio. .

**Palabras clave:** energía undimotriz, convertidores de energía, potencial energético.

#### Abstract

Wave energy, or ocean wave power, is one of the most relevant fields of research in recent years. It is a renewable energy source, although not as widespread as solar or wind power. Mexico has a total coastline of 11,122 km, which could represent a significant potential for generating relatively sustainable energy. A fundamental problem for the implementation of wave energy converters (WECs) is precisely identifying suitable locations to optimize their operational effectiveness. The power generated by a WEC depends on various wave-related parameters such as height, period, depth, and frequency. There are a number of additional parameters, such as wave speed and direction, water temperature, and salinity, which can be assumed to have a relative influence on the operational effectiveness of a WEC. This article also describes the various sources of information where these parameters can be found, notably: Copernicus, NOAA, and GOOS, and national databases such as Atlas Loom and the National Meteorological Service of México. Finally, this article estimates wave energy at thirty-three stations along the Mexican coast using the Linear Wave Power Estimation Theory, which is based primarily on wave height and period parameters. From the estimated energy, geolocation data was developed to identify the wave energy associated with each region under study.

**Key words:** wave energy, wave energy converters, Coastal power potential

**Recibido:** 31 de octubre de 2026.

**Aceptado:** 23 de abril de 2026.

CIATEQ, A.C. Centro de Tecnología Avanzada de Querétaro. Avenida del Retablo 150, Colonia Constituyentes FOVISSSTE, Querétaro C.P. 76150, Querétaro, México.

\* Correspondencia: jose.guillen@ciateq.mx

Esta obra fue creada bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento No Comercial- Sin Obra Derivada 4.0 International



## Introducción

El mar no sólo es una frontera física, sino también un entorno dinámico cargado de energía y posibilidades. En las últimas décadas, la visión de control marino ha evolucionado hacia una comprensión más técnica, en la que el océano comienza a ser concebido como un vector estratégico dentro del sistema energético global. La emergencia de tecnologías de conversión de energía marina, especialmente la undimotriz, representa una de las rutas más rentables, y a la vez complejas, en la búsqueda de fuentes renovables no intermitentes y de alta densidad energética.

A diferencia de otras tecnologías renovables más consolidadas, como la solar o la eólica, los convertidores de energía de olas (*Wave Energy Converters*, WECs) representan un componente tecnológico de interés estratégico para los Estados con amplios litorales, al posibilitar el aprovechamiento del oleaje como fuente energética renovable con aplicaciones potenciales en infraestructura marítima, instalaciones costeras y sistemas autónomos en zonas de interés naval. Estos dispositivos transforman la energía mecánica de las olas en energía eléctrica mediante distintos principios físicos, que van desde columnas de agua oscilante, cuerpos flotantes, atenuadores u overtopping, cuyo desempeño está estrechamente vinculado a las condiciones oceanográficas locales. De acuerdo con lineamientos técnicos internacionales, se reconoce que densidades de potencia superiores a 30 kW/m constituyen un umbral mínimo para la operación eficiente y económicamente viable de WECs, criterio ampliamente utilizado en evaluaciones preliminares del recurso undimotriz de acuerdo a los informes de (*International Energy Agency* [IEA] 2020, *International Electrotechnical Commission* [IEC] 2015).

Desde una perspectiva

estratégico-naval, la caracterización espacial del potencial energético del oleaje identifica zonas prioritarias del litoral con capacidad para sustentar desarrollos tecnológicos orientados a la autosuficiencia energética de instalaciones marítimas, puertos, sistemas de monitoreo oceánico y bases navales remotas. Aunque los WECs continúan en fase de desarrollo, enfrentando desafíos tanto en la ingeniería de dispositivos como en la caracterización precisa de los entornos marinos en búsqueda de su implementación (Barelli *et al.* 2023), actualmente existen prototipos en fases de maduración tecnológica, que promueven el desarrollo nacional para integrar al océano dentro del conjunto de soluciones energéticas sustentables del futuro.

En el caso del litoral mexicano, la variabilidad regional del oleaje, particularmente en el Océano Pacífico, resalta la necesidad de evaluaciones localizadas que integren criterios técnicos, operativos y de seguridad marítima. Asimismo, el desarrollo de WECs adaptados a las condiciones específicas del entorno marino nacional constituye un reto tecnológico con implicaciones directas para la soberanía energética, la resiliencia de infraestructuras costeras y el fortalecimiento de capacidades científicas y tecnológicas en el ámbito naval, en concordancia con las tendencias internacionales de aprovechamiento energético marino y planeación marítima estratégica (IEC 2015, IEA 2020).

## Las olas y su energía potencial

La energía de las olas ha sido objeto de investigación sostenida desde mediados del siglo XX, especialmente a partir de la crisis del petróleo de 1973, que motivó la búsqueda de fuentes renovables más diversificadas (Barelli *et al.* 2023). A pesar



de su enorme potencial estimado, cercano a los 29,500 TWh/año a nivel mundial (IRENA 2020), la tecnología asociada a los convertidores de energía de olas, aún se encuentra en fases de desarrollo, limitada por costos elevados, desafíos estructurales y la variabilidad propia del medio marino (CorPower Ocean 2025).

México, con más de 11,000 km de litoral (SEMARNAT 2025), representa un caso de particular interés. La costa del Pacífico mexicano con 7,828 km, la del Golfo de México y Mar Caribe (3,294 km), con sus características de mar abierto y exposición directa a fenómenos meteorológicos oceánicos, ha sido señalada como una de las regiones con mayor potencial energético por metro lineal de costa (SEMARNAT 2025). Sin embargo, la investigación nacional sobre energía undimotriz ha sido esporádica y centrada en estudios de caso, sin contar aún con una sistematización detallada de los parámetros del oleaje a nivel nacional ni con estimaciones robustas de generación potencial.

En ese contexto, este artículo busca contribuir a una “cartografía energética del oleaje mexicano”, a partir de dos objetivos principales: (1) compilar y analizar los parámetros clave del oleaje registrados en diferentes estaciones a lo largo del litoral nacional, y (2) estimar el potencial energético correspondiente mediante la aplicación del fundamento básico de la determinación de la Energía del Oleaje. Se trata, en esencia, de avanzar en la comprensión del mar no sólo como un espacio natural, sino como una reserva energética cuya explotación responsable forma parte de la transición hacia un modelo energético sostenible y diversificado.

*Desafíos de transformación energética a nivel mundial y nacional*

La transición energética global enfrenta una paradoja estructural: por un lado, existe un consenso científico sobre la necesidad de reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar que el calentamiento global supere los 1.5 °C (DNV 2025); por otro lado, el sistema energético actual sigue dependiendo en gran medida de fuentes fósiles. Según datos del World Bank Group (WBG 2025), países como Arabia Saudita (7.53 kg), Canadá (7.34 kg) y Estados Unidos (6.36 kg) presentan un consumo per cápita de petróleo significativamente mayor al de México, cuyo consumo se sitúa en 1.56 kg por habitante.

Desde la perspectiva de la economía estructural y del análisis insumo-producto, existe amplia evidencia de que la industria petrolera, en particular la refinación y los productos derivados, opera como un sector clave dentro de las economías nacionales y de las cadenas globales de valor (CGV). En este sentido, diversos análisis demuestran que el sector presenta fuertes encadenamientos hacia atrás, al demandar insumos provenientes de industrias como metalmecánica, construcción, transporte, servicios de ingeniería, logística y financieros, lo que le confiere un elevado poder de arrastre sobre la actividad económica. Al mismo tiempo, exhibe encadenamientos hacia adelante, al proveer energía y productos intermedios esenciales para la manufactura, el transporte, la petroquímica y los servicios, actuando como un nodo difusor del crecimiento económico. Análisis empíricos como los realizados por (Zhang & Felmingham 2002, Morrone 2017), basados en matrices insumo-producto identifican a la refinación de petróleo como un sector con alta centralidad productiva y capacidad de transmisión de choques en economías como China y Brasil. Asimismo, desde el enfoque de las

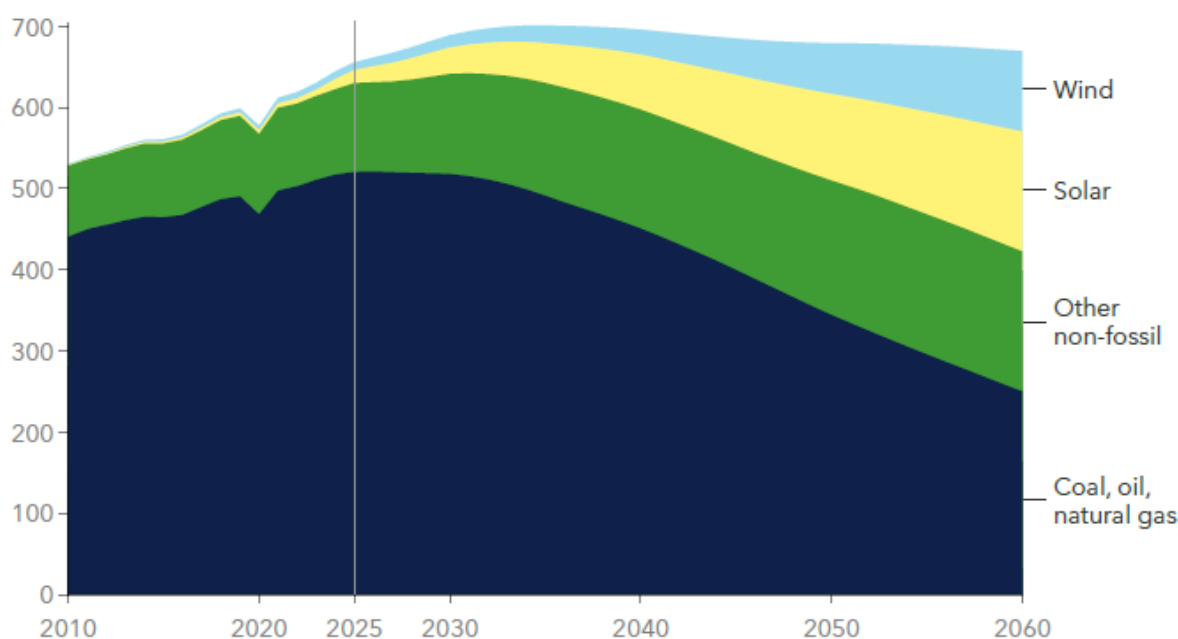
CGV, la industria petrolera se ubica en una posición intermedia estratégica que articula flujos de valor aguas arriba y aguas abajo a escala internacional, reforzando su carácter de nodo consolidado dentro de la red productiva global (Farrokhi 2020).

En este contexto estructural, la figura 1 muestra que, hacia el año 2025, el suministro mundial de energía primaria continúa siendo dominado por los combustibles fósiles, carbón, gas natural y petróleo, lo que refleja no sólo patrones históricos de consumo energético, sino también la persistencia de sectores productivos altamente interconectados y consolidados en la economía global. Si bien las proyecciones hacia 2060 anticipan una mayor participación de fuentes renovables como la solar, la eólica y otras no fósiles, es necesario reconocer que, los combustibles fósiles seguirán desempeñando un papel relevante en el mix energético durante las próximas décadas, particularmente en escenarios de políticas actuales y de

transición gradual (*International Energy Agency [IEA] 2025*). La permanencia del petróleo, sin tintes descalificativos o promocionales en el sistema energético global, no puede entenderse únicamente desde una lógica tecnológica, sino también desde su función económica como sector estratégico que “jala” inversión, empleo y actividad productiva, y simultáneamente “empuja” al resto de la economía mediante el suministro energético y de insumos intermedios, reforzando su papel central dentro de las CGV contemporáneas.

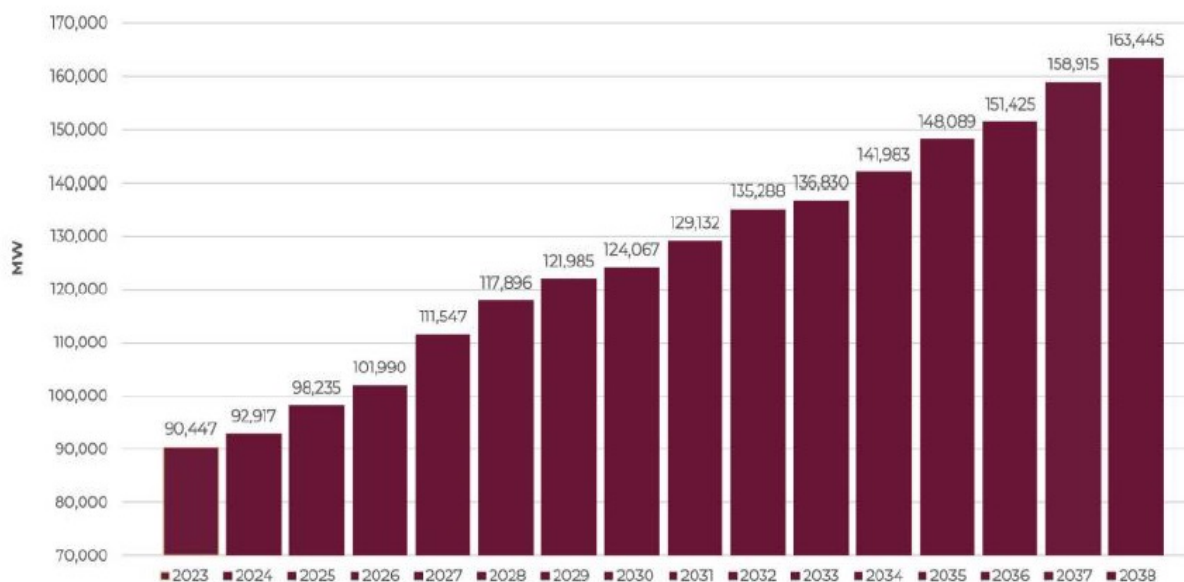
La proyección del suministro de energía primaria global desglosado por fuente energética, expuesto en la figura 1, predice una disminución sostenida del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) a partir de 2025, y un incremento gradual en la participación de fuentes renovables, particularmente solar y eólica, hacia 2060. Esto no representa una contradicción, sino una evidencia de que la transición energética debe ser

Primary energy supply (EJ/yr)



**Figura 1.** Proyección del suministro de energía primaria global desglosado por fuente energética, expresado en exajoules por año (EJ/año) (Fuente: IEA WEB 2025).





**Figura 2.** Proyección de la capacidad instalada acumulada de generación eléctrica en México de 2023 a 2038, expresada en megavatios (MW). Fuente: (SENER 2023).

gestionada de manera realista, progresiva y diversificada.

En el contexto nacional, México proyecta una situación similar en la cual, el consumo neto del Sistema Eléctrico Nacional alcanzó los 333,662 GWh en 2022, con un incremento del 3.4 % respecto al año anterior de acuerdo con la Prospectiva del Sector Eléctrico 2023–2037 (SENER 2023). La capacidad instalada de generación eléctrica sustentable fue de 33,186 MW, con una participación de 36.9 %, concentrada principalmente en hidroeléctrica (38.01 %), eólica (23.30 %) y solar fotovoltaica (22.71 %). La Figura 2 ilustra el crecimiento proyectado de la capacidad instalada acumulada, la cual pasaría de 90,447 MW en 2023 a 163,445 MW en 2038, reflejando una expansión significativa del sistema eléctrico nacional (SENER 2023). Este crecimiento incorpora proyectos de energía limpia, modernización de infraestructura hidroeléctrica y desarrollo de nuevas plantas fotovoltaicas, así como inversiones en gas natural.

En este escenario de evolución gradual,

el papel de tecnologías emergentes como la energía undimotriz cobra importancia estratégica. Si bien dichas tecnologías no reemplazarán a las fuentes tradicionales en el corto plazo, se espera que contribuyan a diversificar la matriz energética, reducir la intermitencia de otras renovables, y aprovechar zonas costeras con alto potencial energético aún no explotado. La proyección presentada por la Secretaría de Energía indica que la capacidad instalada del sistema eléctrico nacional podría incrementarse de aproximadamente 90,447 MW en 2023 a 163,445 MW en 2038, lo que representa un aumento acumulado superior al 80 % en el horizonte analizado. Sin embargo, dicha estimación debe interpretarse como un escenario prospectivo de planeación, construido a partir de supuestos macroeconómicos, demográficos y tecnológicos, así como de trayectorias esperadas de demanda eléctrica, incorporación de nueva capacidad de generación y políticas públicas vigentes al momento de su elaboración, más que como una predicción determinística del crecimiento real del sistema eléctrico.

El Informe Pormenorizado sobre el desempeño y tendencias de la Industria Eléctrica Nacional (SENER 2023) se apoya en información histórica de capacidad instalada, generación y consumo eléctrico, complementada con modelos de planeación energética utilizados por la SENER para evaluar escenarios de expansión del sistema. No obstante, estas proyecciones no desagregan explícitamente la contribución de tecnologías emergentes, como la energía undimotriz, ni incorporan con detalle las restricciones técnicas, económicas y ambientales asociadas a su despliegue. En este sentido, el posible crecimiento de la capacidad instalada no implica automáticamente la viabilidad de todas las fuentes alternativas, sino que refuerza la necesidad de estudios específicos de caracterización del recurso, análisis de costos, evaluación de riesgos y compatibilidad con el sistema eléctrico nacional, particularmente en el caso de tecnologías marinas cuya madurez tecnológica y condiciones de integración aún presentan elevados niveles de incertidumbre.

### ***Revisión de estudios previos sobre parámetros del oleaje en costas mexicanas***

Diversas investigaciones han caracterizado las condiciones del oleaje en el litoral mexicano, destacando diferencias significativas entre la costa del Pacífico y el Golfo de México. Por ejemplo, en (González-Ramírez *et al.* 2017) identificaron que los estados del Pacífico como Nayarit, Colima, Guerrero, Oaxaca y Chiapas presentan un oleaje más regular y con mayores alturas promedio en comparación con las costas del Golfo y Caribe.

En el Pacífico, se reportan alturas significativas ( $H_s$ ) entre 1 y 1.5 m y períodos típicos de  $T \approx 10$ s, mientras que en el Golfo de México estas métricas son inferiores,

con amplitudes generalmente menores a 1 m. Estudios focalizados en regiones específicas han complementado este panorama. (Ventura *et al.* 2022) reportan valores de  $H_s$  de hasta 3 m en la región de Baja California Sur; mientras que, para el Pacífico Sur, se han registrado longitudes de onda ( $\lambda$ ) de hasta 330 m y velocidades de propagación superiores a 12 m/s. Por su parte, (Ruiz *et al.* 2009) analizaron un compendio de datos históricos (1948–2007), concluyendo que las condiciones más energéticas se concentran en el litoral pacífico, particularmente en Acapulco y Oaxaca. Estos antecedentes respaldan la hipótesis de que el litoral occidental mexicano posee un potencial undimotriz superior, lo cual ha motivado la aplicación de modelos para estimar cuantitativamente el flujo de energía por unidad de frente de ola.

### **Metodología y fuentes de información**

El análisis del potencial energético del oleaje se desarrolló mediante un enfoque metodológico secuencial, orientado a garantizar la consistencia física, la representatividad espacial y la pertinencia técnica de los datos empleados. En una primera etapa, se realizó una revisión sistemática de literatura científica y técnica relacionada con estudios regionales y nacionales sobre oleaje, ingeniería marina y aprovechamiento de energías marinas renovables. Lo anterior con el objetivo de identificar los parámetros oceanográficos clave, los rangos de validez de los modelos energéticos y las mejores prácticas metodológicas reportadas en la literatura especializada. Se estudiaron treinta y siete artículos que reportan diversos aspectos del oleaje en costas mexicanas, enfocándose exclusivamente en trabajos que analizaran el comportamiento del oleaje dentro del territorio nacional.



Como criterios de inclusión, se tuvieron en cuenta artículos científicos, informes técnicos y documentos académicos elaborados en el océano Pacífico, el golfo de México y el mar Caribe, siempre que presentaran información cuantitativa sobre el oleaje o datos que permitieran su análisis. En los casos donde algún parámetro no se reportó de manera explícita, se calculó a partir de la información disponible, utilizando relaciones teóricas y procedimientos comúnmente aceptados en la literatura oceanográfica.

Por otro lado, los criterios de exclusión incluyeron estudios de alcance global o regional que no ofrecieran un análisis específico para México, así como publicaciones sin respaldo metodológico, fuentes de divulgación no científica y trabajos cuyo enfoque principal no estuviera directamente relacionado con la caracterización del oleaje.

La búsqueda de información se realizó en bases de datos científicas tales como Scopus, repositorios académicos y plataformas institucionales, utilizando palabras clave relacionadas con el oleaje y los parámetros oceanográficos de interés en las costas mexicanas. Este proceso garantizó una recopilación de información pertinente, confiable y alineada con los objetivos del estudio. El compendio de los resúmenes de los artículos se encuentra en el micrositio de Mendeley Datos (Cano Figueroa & Guillén Guzmán 2025).

En una segunda etapa, se llevó a cabo una caracterización técnica y comparativa de bases de datos oceanográficas públicas, tanto nacionales como internacionales, que proporcionan información relevante para la estimación de la energía del oleaje. Las fuentes fueron evaluadas con base en criterios explícitos de: i) cobertura geográfica, priorizando información representativa de las costas mexicanas; ii) disponibilidad

de parámetros físicos fundamentales para la estimación energética, tales como altura significativa de ola, período dominante, dirección de propagación y, de manera complementaria, variables oceanográficas como temperatura, salinidad y corrientes; y iii) resolución temporal y capacidad de capturar variabilidad estacional, aspectos críticos para el análisis del recurso undimotriz.

Las bases de datos consultadas incluyeron el *Copernicus Marine Service* (MyOcean Viewer 2025), que proporciona productos satelitales globales de oleaje, temperatura superficial y corrientes oceánicas con resolución horaria y formato NetCDF; el Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano, desarrollado por instancias del Gobierno de México, que concentra registros históricos de altura y período de ola provenientes de 61 estaciones distribuidas en el litoral del Océano Pacífico y el Golfo de México; información del National Hurricane Center, utilizada de manera referencial para la identificación de eventos extremos, dada su relevancia para la evaluación de condiciones operativas límite; así como los registros del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, a través del Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCO), que ofrece mediciones in situ de oleaje, temperatura y corrientes con resolución horaria a lo largo del litoral mexicano. De forma complementaria, se emplearon datos de *Southeast Coastal Ocean Observing Regional Association*, con fines comparativos, debido a su alta frecuencia temporal de muestreo, aun cuando su cobertura no se centra en territorio nacional.

Los datos sobre el oleaje de los treinta y tres puntos geográficos analizados en este estudio fueron extraídos del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM). Este atlas reúne información obtenida a

partir de mediciones instrumentales realizadas en diversas zonas de monitoreo oceanográfico del país. Proporciona valores representativos del régimen medio de oleaje, incluyendo parámetros como la altura de ola, el periodo y la frecuencia, basándose en registros continuos obtenidos mediante boyas tipo MKIII *Datawell*. Los puntos seleccionados están estratégicamente distribuidos a lo largo del océano Pacífico, el Golfo de México y el mar Caribe, con el fin de reflejar adecuadamente la variabilidad espacial del oleaje en las costas mexicanas. Para cada sitio, se tomaron en cuenta las características reportadas en el atlas, como la ubicación geográfica, la profundidad de instalación del instrumento y los rangos típicos de los parámetros de oleaje.

En aquellos casos donde el ATLOOM no proporcionó directamente algún parámetro necesario para el análisis, se estimó a partir de las variables disponibles, utilizando relaciones físicas ampliamente aceptadas en la literatura oceanográfica. La información recopilada fue analizada posteriormente en términos de estacionariedad, consistencia y formato de los datos, y su resumen se presenta en la tabla I, en la que se detallan las variables finalmente utilizadas de Altura y Período promedio para el análisis energético desarrollado en este estudio.

### Estimación de la potencia del oleaje

El análisis del potencial energético del oleaje se basa en principios fundamentales de la mecánica de fluidos, particularmente en el comportamiento de ondas superficiales en un medio continuo. En condiciones de amplitudes pequeñas y sin efectos no lineales relevantes, el oleaje puede describirse mediante un modelo de onda sinusoidal periódica en régimen

lineal, que constituye una aproximación conocida como modelo de olas o teoría lineales de olas (Holthuijsen 2007). Este enfoque parte de una solución idealizada de las ecuaciones de Euler para fluidos incompresibles e irrotacionales, bajo una superficie libre. Las suposiciones centrales incluyen:

- Pequeña amplitud de la onda respecto a la profundidad del agua y a la longitud de onda ( $H \ll d, H \ll \lambda$ ).
- Flujo potencial (sin viscosidad ni rotación).
- Fondo oceánico horizontal.
- Ausencia de corrientes o vientos.

Bajo estas condiciones, se pueden obtener expresiones analíticas para describir la energía transportada por una onda superficial, así como su velocidad de propagación (velocidad de grupo).

### Energía y potencia del oleaje

Las ondas superficiales del mar constituyen sistemas dinámicos capaces de almacenar y transportar energía mecánica a través de la interacción entre el campo gravitacional terrestre y el desplazamiento oscilatorio de masas fluidas. Bajo el enfoque de ola periódica en régimen lineal, esta energía se manifiesta en dos componentes equivalentes: energía potencial, derivada de la elevación de la superficie libre respecto al nivel medio, y energía cinética, asociada al movimiento orbital de las partículas de agua en el seno del fluido.

La energía total por unidad de área superficial puede expresarse como:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \text{ [J/m}^2\text{]}$$



**Tabla I.** Datos de coordenadas, altura promedio (Hs), el periodo de la ola (Te)

Lugar	Latitud	Longitud	Hs prom (m)	Te prom (s)
Ensenada B.C.N.	31.8083	116.6519	1.5	15
Isla Cedros B.C.	28.1165	115.1311	1.75	15
San Carlos B.C.S.	24.6888	112.3138	1.5	15
Cabo San Lucas B.C.S.	22.8708	109.8862	1.75	15
Mazatlán, Sin.	23.1704	106.4	1.25	15
Puerto Vallarta, Jal.	20.6519	105.2616	0.5	13
Manzanillo, Col.	19.0665	104.3443	1.5	15
Coyutlán, Col.	18.991	104.2603	1.75	15
Lázaro Cárdenas, Mich.	17.8899	102.219	1.75	15
Acapulco, Gro.	16.7898	99.8623	1.5	15
Huatulco, Oax.	15.737	96.1178	1.25	15
Salina Cruz, Oax.	16.1326	95.1861	1.5	15
Puerto Chiapas, Chis.	14.6723	92.4294	1.25	15
Loreto, B.C.S.	26.1005	111.0639	1	11
Puerto Peñasco, Son.	31.3032	113.7898	1.15	7
Bahía de Kino, Son.	28.7519	112.0359	1.7	7
Guaymas, Son.	27.8669	110.8449	0.6	7
Yavaros, Son.	26.581	9.5824	1	7
Topolobampo, Son.	25.5051	109.2203	1	15
Mezquital, Tamps.	25.2816	97.1402	1.5	7
Altamira, Tamps.	22.4357	97.752	1	7
Tampico, Tamps.	22.3502	97.7184	1.75	9
Tuxpan, Ver.	20.9379	97.183	1.75	7
Tecolutla, Ver.	20.536	96.9648	1	7
Bahía de Vergara, Ver.	19.2644	96.1447	0.75	7
Veracruz, Ver.	19.2058	96.1132	1.25	7
Dos Bocas, Ver.	18.4934	93.2091	1.25	7
Frontera, Tab.	18.7584	92.9015	1.25	7
Seybaplaya, Tab.	19.6403	90.9768	1	7
Progreso, Yuc.	21.5893	89.6913	2.7	7
Puerto Juárez, Q. Roo	21.1781	86.701	1.4	7
Cozumel, Q. Roo	20.5188	86.9508	0.55	7
Mahahual, Q. Roo	18.709	87.7036	1.05	7

donde E es la densidad de energía (J/m<sup>2</sup>),  $\rho$  representa la densidad del agua de mar, g la aceleración gravitacional, y H la altura de ola considerada. Este valor describe la capacidad energética instantánea almacenada en una onda idealizada y se convierte en una magnitud operativa al

considerar el transporte de energía a lo largo de la dirección de propagación. En condiciones de aguas profundas, la velocidad de grupo  $c_g$ , entendida como la velocidad con la que se transmite la energía en el campo ondulatorio,  $c_g = \frac{gT}{4\pi}$  permite

definir la potencia específica del oleaje por unidad de ancho de frente como:

$$P = E \cdot c_g = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \cdot \left(\frac{gT}{4\pi}\right) = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi}$$

donde  $T$  es el período de la onda. Dado que el oleaje marino real presenta irregularidades espectrales y temporales, la formulación se adapta estadísticamente utilizando la altura significativa ( $H_s$ ) y el período energético ( $T_e$ ) para oleaje irregular, parámetros representativos del conjunto de olas observadas. Así, la estimación de la densidad de potencia se generaliza como:

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_e}{32\pi} \text{ [W/m]}$$

Esta expresión permite cuantificar el flujo energético medio por metro de frente de ola (kW/m), siendo ampliamente utilizada en estudios de potencial undimotriz, mediante datos provenientes de sistemas de monitoreo *in situ*, altimetría satelital o modelado numérico. Su simplicidad formal, combinada con su aplicabilidad práctica, la convierten en una herramienta básica en las fases iniciales de caracterización energética de zonas costeras.

Los cuatro parámetros clave para la estimación de la potencia del oleaje, son consistentes con la formulación lineal adoptada. La  $H_s$  se utilizó como indicador estadístico del oleaje, al representar la media del tercio superior de las alturas registradas durante un intervalo de tiempo determinado. El  $T_e$  por su parte, se consideró como el período representativo del transporte de energía, derivado del espectro de frecuencia del oleaje. Se adoptaron valores estándar para la densidad del agua de mar ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ) y para la aceleración gravitacional ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ). Los datos se recopilaron de 33 estaciones de monitoreo pertenecientes a la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y

Meteorológicas (RENEOM, 2025). Aunque este enfoque asume una dinámica lineal permite obtener una primera aproximación confiable del recurso energético en zonas de aguas profundas o intermedias, es importante reconocer sus limitaciones inherentes.

El modelo no contempla efectos no lineales como el rompimiento de olas, la interacción con estructuras costeras, la influencia del viento ni la disipación por fricción con el fondo marino. Por ello, si bien resulta útil para análisis exploratorios y comparativos entre regiones, su aplicación en contextos de diseño o simulación operativa debe complementarse con validaciones empíricas y, en etapas avanzadas, con modelos numéricos de mayor complejidad que capturen la dinámica real del entorno marino.

### Potencial energético del oleaje en el litoral mexicano: estimación y análisis espacial focalizado

Los resultados de la estimación de potencia del oleaje se muestran en la tabla II. Dichos resultados revelan una clara ventaja del litoral del Océano Pacífico en comparación con el Golfo de México y el Mar Caribe. A partir del procesamiento de datos recolectados en 33 estaciones de monitoreo costero, se obtuvo la potencia teórica del oleaje en unidades de watts por metro (W/m), aplicando un modelo físico simplificado para condiciones de aguas profundas.

Con el fin de facilitar la interpretación comparativa de los resultados y destacar regiones con distinto grado de aprovechamiento energético del oleaje, los valores de energía  $E$  y potencia  $P$  se clasificaron mediante un esquema cromático basado en umbrales físicos y técnicos ampliamente utilizados en la literatura



especializada. En el caso de la potencia del oleaje, se adoptó un umbral de 30 kW/m como referencia de alto potencial, ya que este valor suele considerarse el mínimo requerido para una operación eficiente de convertidores de energía de olas en

condiciones medias. Valores intermedios entre 10 y 30 kW/m se clasificaron como potencial medio, mientras que valores inferiores a 10 kW/m se consideraron de bajo potencial.

De manera análoga, la energía media

**Tabla II.** Energía y potencia estimada de las 33 regiones analizadas

Lugar	Hs prom (m)	Te prom (s)	Energía(J/m <sup>2</sup> )	Potencia (W/m)
Lázaro Cárdenas, Mich.	1.75	15	3,849.28	65,716.06
Isla Cedros B.C.	1.75	15	3,849.28	60,460.28
Coyutlán, Col.	1.75	15	3,849.28	59,978.07
Cabo San Lucas B.C.S.	1.75	15	3,849.28	58,197.45
Progreso, Yuc.	2.7	7	9,162.85	54,216.32
Ensenada B.C.N.	1.5	15	2,828.04	48,281.19
Salina Cruz, Oax.	1.5	15	2,828.04	48,281.19
Acapulco, Gro.	1.5	15	2,828.04	45,349.07
Manzanillo, Col.	1.5	15	2,828.04	43,389.57
San Carlos B.C.S.	1.5	15	2,828.04	37,252.08
Tampico, Tamps.	1.75	9	3,849.28	34,257.24
Mazatlán, Sin.	1.25	15	1,963.92	33,528.60
Puerto Chiapas, Chis.	1.25	15	1,963.92	33,528.60
Huatulco, Oax.	1.25	15	1,963.92	27,136.17
Tuxpan, Ver.	1.75	7	3,849.28	23,165.73
Bahía de Kino, Son.	1.7	7	3,632.46	22,999.71
Topolobampo, Son.	1	15	1,256.91	21,458.31
Mezquital, Tamps.	1.5	7	2,828.04	17,710.07
Puerto Juárez, Q. Roo	1.4	7	2,463.54	15,427.44
Frontera, Tab.	1.25	7	1,963.92	13,050.79
Veracruz, Ver.	1.25	7	1,963.92	12,727.67
Dos Bocas, Ver.	1.25	7	1,963.92	12,298.66
Loreto, B.C.S.	1	11	1,256.91	10,948.31
Puerto Peñasco, Son.	1.15	7	1,662.26	10,409.59
Seybaplaya, Tab.	1	7	1,256.91	9,002.09
Mahahual, Q. Roo	1.05	7	1,385.74	8,677.94
Altamira, Tamps.	1	7	1,256.91	7,871.14
Tecolutla, Ver.	1	7	1,256.91	7,564.32
Yavaros, Son.	1	7	1,256.91	7,235.09
Bahía de Vergara, Ver.	0.75	7	707.01	3,976.46
Puerto Vallarta, Jal.	0.5	13	314.23	3,903.80
Guaymas, Son.	0.6	7	452.49	2,865.02
Cozumel, Q. Roo	0.55	7	380.21	2,635.80

del oleaje se categorizó en tres niveles a partir de la energía superficial asociada a la altura significativa promedio. Se consideraron valores superiores a  $3000 \text{ J/m}^2$  como representativos de alto contenido energético, valores entre  $1000$  y  $3000 \text{ J/m}^2$  como intermedios, y valores inferiores a  $1000 \text{ J/m}^2$  como bajos. Esta clasificación, consistente con los rangos de  $H_s$  observados y con estudios previos de caracterización del recurso undimotriz, permite una evaluación preliminar del potencial relativo entre distintas regiones costeras, sin sustituir análisis detallados de variabilidad temporal ni estudios de factibilidad tecnológica específicos.

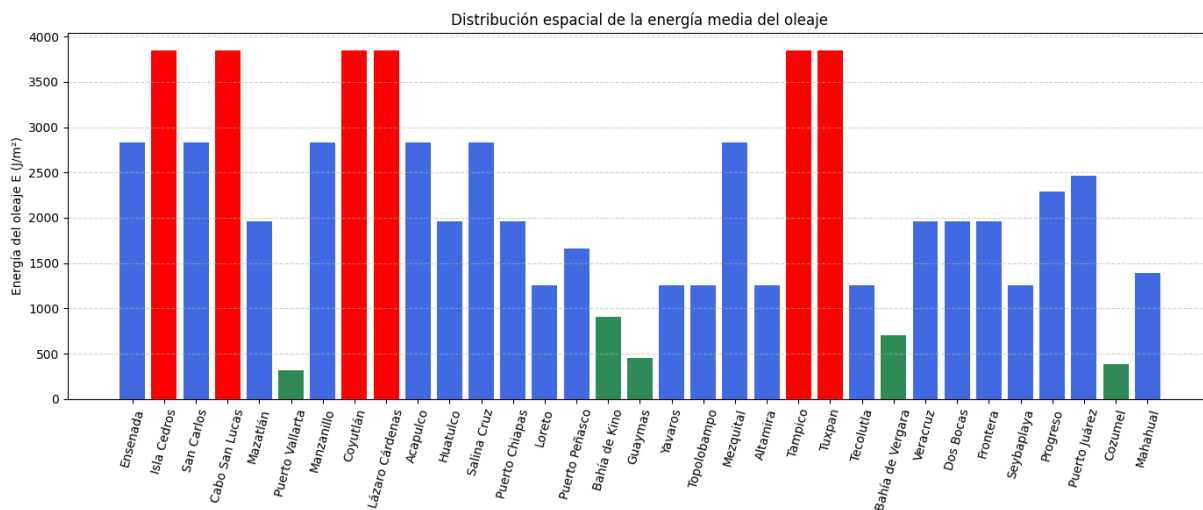
La energía media del oleaje  $E$  se calculó a partir de la altura significativa promedio  $H_s$ , representando la energía superficial disponible por unidad de área. Los colores indican niveles relativos de potencial energético: rojo para valores altos ( $E \geq 3000 \text{ J/m}^2$ ), azul para valores intermedios ( $1000 \leq E < 3000 \text{ J/m}^2$ ) y verde para valores bajos ( $E < 1000 \text{ J/m}^2$ ). Esta clasificación permite identificar regiones con mayor densidad energética asociada al oleaje medio.

La gráfica de la figura 4 muestra la variación del potencial energético del oleaje a lo largo de 33 estaciones de

monitoreo distribuidas en el litoral mexicano. Se observa una marcada heterogeneidad espacial, con valores máximos que superan los  $30 \text{ kWh/m}$  en algunas zonas del Pacífico (notablemente en las estaciones 2, 4, 8 y 9). En contraste, varias estaciones del Golfo presentan valores considerablemente menores, por debajo de los  $30 \text{ kWh/m}$ , lo que indica una menor viabilidad para la instalación de tecnologías undimotrices en esas regiones. Esta distribución resalta la necesidad de análisis locales detallados para identificar sitios con mayor rendimiento energético y justificar inversiones tecnológicas.

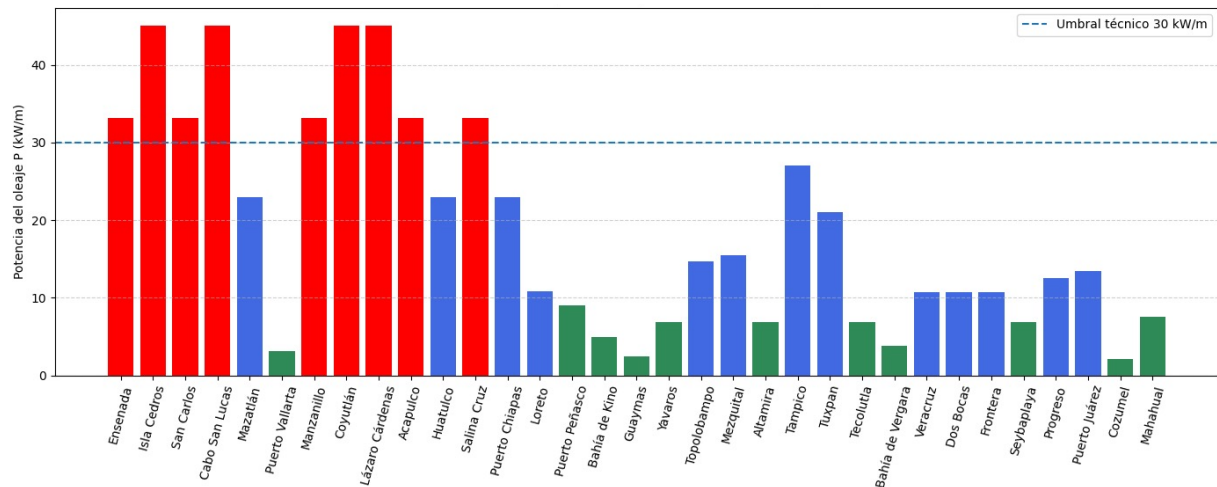
La potencia del oleaje  $P$  se estimó a partir de valores promedio de altura significativa  $H_s$  y período energético  $T_e$ , empleando una formulación teórica válida para aguas profundas. Las barras se clasifican cromáticamente según umbrales técnicos relevantes: rojo para sitios con alto potencial ( $P \geq 30 \text{ kW/m}$ ), azul para potencial medio ( $10 \leq P < 30 \text{ kW/m}$ ) y verde para bajo potencial ( $P < 10 \text{ kW/m}$ ). La línea discontinua indica el umbral mínimo de  $30 \text{ kW/m}$ , comúnmente reportado en la literatura como referencia para la viabilidad técnica de convertidores de energía undimotriz.

La visualización geoespacial presentada



**Figura 3.** Distribución espacial de la energía media del oleaje en el litoral mexicano.





**Figura 4.** Distribución espacial de la potencia media del oleaje a lo largo del litoral mexicano.

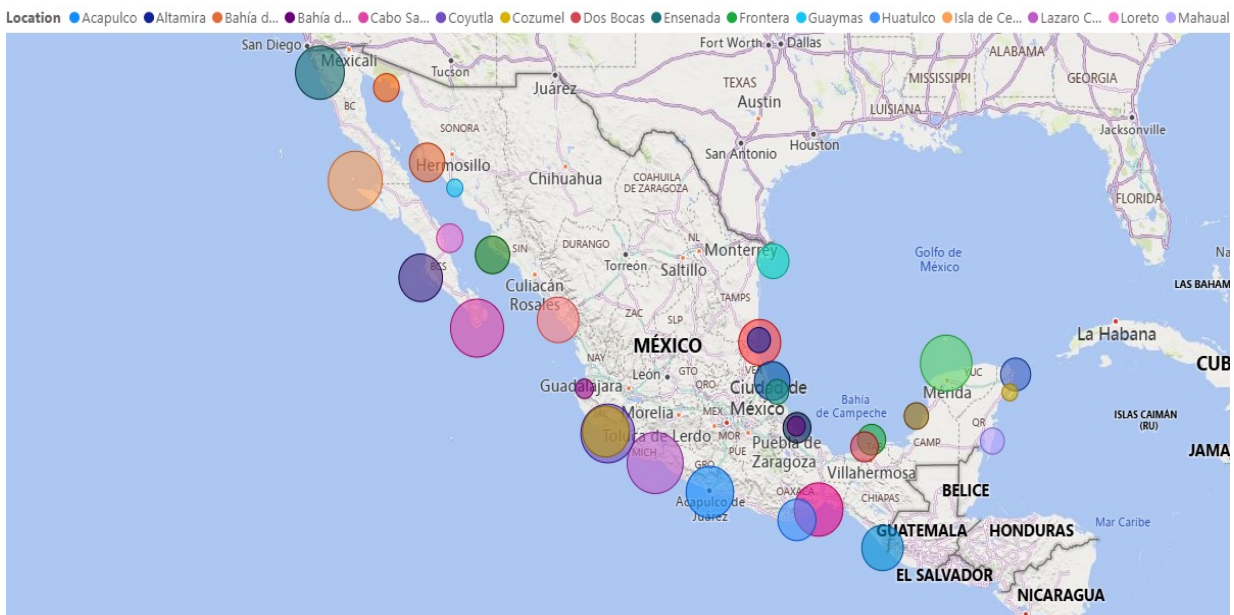
en la figura 5 permite observar el potencial energético del oleaje estimado ( $P$ , en  $W/m$ ) para las 33 zonas costeras evaluadas en el litoral mexicano. El tamaño de los círculos representa la magnitud del potencial energético, lo que facilita la identificación de zonas prioritarias para el aprovechamiento de energía undimotriz.

El tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud del valor estimado. Datos calculados con base en parámetros significativos de oleaje ( $H$ ,  $T$ ) y ecuaciones

de energía para aguas profundas.

Del análisis se destacan los siguientes hallazgos:

- Progreso, Yucatán muestra el valor más alto de potencial energético con 494,170.42  $W/m$ , superando incluso a los principales sitios del Pacífico. Esta anomalía sugiere un comportamiento oceánico local excepcional o condiciones de fondo favorables que podrían justificar estudios detallados.
- En el litoral Pacífico, destacan Isla de Cedros, Coyutlán, Cabo San Lucas y



**Figura 5.** Distribución geoespacial del potencial energético del oleaje ( $W/m$ ) estimado para 33 estaciones de monitoreo costero en México.

Lázaro Cárdenas, con valores superiores a 444,000 W/m, lo cual los posiciona como candidatos estratégicos para el desarrollo de proyectos piloto de energía undimotriz.

- Las zonas con potencial moderado (100,000 a 300,000 W/m) incluyen regiones del Golfo como Tuxpan, Tampico y Puerto Juárez, así como varios sitios del Pacífico central.
- En contraste, áreas como Guaymas, Cozumel o Puerto Vallarta presentan valores inferiores a 30,000 W/m, lo que implica una viabilidad técnica limitada para la implementación de tecnologías convencionales de conversión de energía del oleaje.

En conjunto, el mapa confirma la heterogeneidad espacial del recurso a lo largo del país, evidenciando la importancia de realizar evaluaciones localizadas que consideren no sólo la magnitud de los parámetros oceanográficos, sino también variables como batimetría, accesibilidad y uso del suelo costero.

En la tabla II se muestra el conjunto de estaciones, de las cuales doce ubicaciones

superaron el umbral de 30 kW/m (30,000 W/m), establecido por (*CorPower Ocean 2025*) como referencia mínima para justificar la implementación de tecnologías de conversión de energía undimotriz (*Wave Energy Converters, WECs*). En la figura 6 se presenta el mapa de distribución del potencial energético. Esta visualización, elaborada con *Power BI* a partir de datos de la *RENEOM (2025)*, identifica las zonas costeras prioritarias para estudios de detalle, incluyendo modelado numérico, análisis batimétrico y evaluaciones de viabilidad técnica y económica para la instalación de convertidores de energía del oleaje.

Los principales hallazgos son los siguientes:

- Diez de las doce estaciones con mayor potencial se ubican en la vertiente del Pacífico mexicano, confirmando su carácter predominante en cuanto a condiciones energéticas del oleaje. Destacan especialmente:
- Lázaro Cárdenas, Michoacán: 65,716 W/m.



**Figura 6.** Distribución geoespacial de estaciones costeras con potencia de oleaje superior a 30 kW/m.



- Isla Cedros, Baja California: 60,460 W/m.
- Coyutla, Colima: 59,978 W/m.
- Cabo San Lucas, B.C.S.: 58,197 W/m.
- Dos estaciones en el Golfo/Caribe también superaron este umbral, lo cual resulta notable dadas las condiciones en general más moderadas de esa región:
- Progreso, Yucatán: 54,216 W/m.
- Tampico, Tamaulipas: 34,257 W/m.

Estos resultados evidencian que, si bien el promedio regional es más alto en el Pacífico, existen nichos de alto potencial energético también en el litoral oriental del país. Esto refuerza la necesidad de realizar evaluaciones localizadas, considerando la alta variabilidad espacial del recurso, incluso dentro de una misma región oceánica.

A pesar de las limitaciones del modelo lineal utilizado —que no considera efectos no lineales, batimetría detallada ni estacionalidad del oleaje—, los resultados proporcionan una primera aproximación robusta del potencial energético costero nacional. Esta información constituye un insumo estratégico para orientar políticas de desarrollo energético marino, selección de sitios piloto y diseño de futuras campañas de medición *in situ* o simulación computacional avanzada (CFD, SWAN, WAM, etc.).

### Comentarios finales

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que el litoral mexicano presenta una distribución espacial altamente heterogénea del potencial energético del oleaje, con implicaciones que trascienden el ámbito estrictamente energético y adquieren relevancia en términos estratégicos y de seguridad nacional. A partir de un modelo físico simplificado y del análisis

de datos provenientes de 33 estaciones de monitoreo, se identificó que el litoral del Océano Pacífico concentra la mayor proporción de localidades con valores de potencia superiores a 30 kW/m, umbral comúnmente asociado con la viabilidad técnica de sistemas de conversión de energía de olas. Estos resultados, si bien exploratorios, permiten delinear zonas prioritarias de interés para futuras evaluaciones de factibilidad y desarrollos tecnológicos con aplicaciones en infraestructura costera de carácter estratégico.

No obstante, la concentración de valores elevados en el Pacífico no implica una uniformidad regional. El análisis revela contrastes significativos incluso dentro de una misma cuenca, particularmente en zonas del Golfo de California y en costas parcialmente protegidas, donde el potencial energético disminuye de forma notable. Este comportamiento pone de manifiesto que el aprovechamiento de la energía del oleaje depende de condiciones locales específicas, como la batimetría, la orientación de la línea de costa y el grado de exposición al mar abierto. Desde una perspectiva estratégica, estos factores resultan determinantes para la localización óptima de infraestructuras energéticas costeras, especialmente aquellas orientadas a operar de manera autónoma o semiautónoma en apoyo a instalaciones portuarias, estaciones de vigilancia y plataformas operativas remotas.

Asimismo, la identificación de valores intermedios y, en algunos casos, elevados en regiones del Golfo de México y del Caribe mexicano, como Progreso y Tampico, pone de relieve que el potencial undimotriz no se limita al Pacífico. Estos hallazgos adquieren particular relevancia para la planeación del espacio marino nacional, al evidenciar oportunidades para el aprovechamiento energético en

zonas donde convergen rutas comerciales, puertos estratégicos, infraestructura energética y nodos logísticos de importancia nacional. En este sentido, el estudio contribuye a una lectura más matizada del territorio costero, evitando generalizaciones que podrían conducir a decisiones subóptimas en términos de inversión y desarrollo tecnológico.

Desde el punto de vista metodológico, el uso de un modelo físico lineal permitió establecer un primer orden de magnitud del recurso energético disponible, adecuado para estudios de alcance nacional y comparativo. Sin embargo, se reconoce que este enfoque no incorpora procesos dinámicos complejos ni la variabilidad temporal de alta resolución, aspectos críticos para aplicaciones operativas y de diseño. Por ello, se considera indispensable que investigaciones futuras integren modelos numéricos avanzados, simulaciones estacionales y análisis de eventos extremos, particularmente relevantes en contextos donde la resiliencia de la infraestructura y la continuidad operativa constituyen factores clave.

Los resultados también resaltan la importancia estratégica de fortalecer la red nacional de monitoreo oceanográfico, no solo como herramienta para la evaluación del potencial energético, sino como un componente esencial de la capacidad de observación y control del dominio marítimo. La ampliación de esta infraestructura de monitoreo contribuiría simultáneamente a la seguridad marítima, a la gestión de riesgos costeros y al desarrollo de tecnologías energéticas marinas con aplicaciones duales.

Finalmente, este trabajo se concibe como una línea base de referencia orientada a impulsar una agenda nacional de investigación y desarrollo en energía undimotriz, con un enfoque estratégico

que integre consideraciones tecnológicas, operativas y de seguridad. Más allá de la caracterización preliminar del recurso, los resultados apuntan a la necesidad de promover el desarrollo tecnológico propio, orientado a sistemas robustos, modulares y adaptables a las condiciones específicas del entorno marino mexicano, con potencial para suministrar energía a instalaciones costeras críticas, sistemas de monitoreo y plataformas estratégicas. En este contexto, la energía de las olas emerge como un recurso de alto valor estratégico, capaz de contribuir a la diversificación energética, la soberanía tecnológica y el fortalecimiento de las capacidades nacionales en el ámbito costero y oceánico.

#### Referencias

- Barelli, L., Bidini, G., Ciupageanu, D. A., Ottaviano, A., Pelosi, D., Gallorini, F., & Cruz, M. 2023.** An effective solution to boost generation from waves: Benefits of a hybrid energy storage system integration to wave energy converter in grid-connected systems. *Open Research Europe* 1-35.
- Cano Figueroa, M. A. & F. Guillén Guzmán. 2025.** Base de datos de parámetros de oleaje. Mendeley Data. Disponible en:  
<https://data.mendeley.com>
- Copernicus Marine Service. 2025.** Copernicus Marine MyOcean Viewer. Disponible en:  
<https://marine.copernicus.eu>
- CorPower Ocean. 2025.** A short history of wave energy. Disponible en:  
<https://corpowers.com/a-short-history-of-wave-energy>
- DNV. 2025.** Energy Transition Outlook 2025. DNV.
- Farrokhi, F. 2020.** Global sourcing in oil markets. *Journal of International Economics*, 125, 103323.
- Gobierno de México. 2025.** Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM). Instituto Mexicano del Transporte. Disponible en:  
<https://www.imt.mx/sitioIMT/DIPC/ServiciosTecnologicos/Atloom/frmATLOOM.php>



**Holthuijsen, L. H. 2027.** Waves in oceanic and coastal waters. Cambridge University Press.

**International Energy Agency. 2025.** World Energy Outlook 2025. IEA.

**Morrone, H. 2017.** Which sectors to stimulate first in Brazil? Estimating the sectoral power to pull the economy out of the recession. *Investigación Económica* 76(302): 37–70.

**Observatorio Oceanográfico Regional Costero (OORCO). 2025.** Observatorio Oceanográfico Regional Costero. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Disponible en:

<https://oorco.ens.uabc.mx/>

**Secretaría de Energía. 2023.** Informe pormenorizado sobre el desempeño y tendencias de la industria eléctrica nacional. Gobierno de México.

**Secretaría de Energía. 2023.** Prospectiva del Sector Eléctrico 2023–2037. Gobierno de México.

**World Bank Group. 2025.** Energy use per capita (kg of oil equivalent). Disponible en:

<https://data360.worldbank.org/>