



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis de la variabilidad del clima marítimo en México

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Erik Josué Tapia García

DIRECTORA DE TESIS

Dra. Valeria Chávez Cerón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

AGRADECIMIENTOS

A mis abuelos, Guadalupe y Sergio, por ser los primeros en confiar en mí, brindarme la oportunidad lograr esto y formar la persona que hoy soy.

A la Dra. Valeria Chávez Cerón, por su confianza, guía y apoyo durante este proyecto. Por compartir conmigo su pasión por la Ingeniería de Costas.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería, por su ayuda y amistad.

A Leslie, por ofrecerme el apoyo y motivación que tantas veces necesité.

ÍNDICE

I. Introducción	1
II. Objetivos.....	3
II.1. Objetivo general	3
II.2. Objetivos particulares	3
III. Marco teórico	4
III.1. Energía en el viento y oleaje.....	4
III.2. El Niño Oscilación del Sur (ENSO).....	7
III.3. Índices de referencia del ENSO.....	10
III.4. Clustering.....	14
III.4.1. <i>K-means</i>	15
III.4.2. <i>Coficiente de silueta</i>	16
IV. Materiales y métodos.....	18
IV.1. Zona de estudio.....	18
IV.2. Base de datos	20
IV.3. Periodos de análisis	22
IV.4. Delimitación de la región de estudio	23
IV.5. Estadísticos representativos.....	23
IV.6. Variación temporal de la potencia de viento y oleaje	23
IV.7. Clustering de la información	24
V. Resultados y discusión.....	27
V.1. Periodos analizados y región de estudio.....	27
V.2. Estadísticos representativos.....	31
V.3. Tendencias de variación de las potencias de viento y oleaje	32
V.4. Clústeres de variación de las potencias de viento y oleaje	40
VI. Conclusiones.....	48
VI.1. Futuras líneas de investigación.....	49
Referencias	50

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. (a) Radiación solar en la superficie terrestre; (b) Celdas de convección atmosférica. Modificadas de: (Webb 2023).	5
Figura 2. Parámetros descriptivos del oleaje. Tomada de: (Chávez 2011).....	6
Figura 3. Representación gráfica de la fase neutra. Modificada de: (Webb 2023).....	8
Figura 4. Representación gráfica de El Niño. Modificada de: (Webb 2023).	9
Figura 5. Representación gráfica de La Niña. Modificada de: (Webb 2023).....	10
Figura 6. Patrones de presión durante El Niño (a) y La Niña (b). Modificada de: (NOAA 2009).....	11
Figura 7. Interacción de los mecanismos físicos detrás del MEI.v2. Modificada de: (NOAA 2024b).....	12
Figura 8. Promedios base de la temperatura superficial del mar. Modificada de: (NOAA 2017).....	13
Figura 9. Clustering de un conjunto de objetos utilizando el método K-means (el centroide de cada clúster se indica con +). Modificada de: (Han et al. 2012).....	16
Figura 10. Ecorregiones marinas de México. 1) Norte del Golfo de México, 2) Sur del Golfo de México, 3) Mar Caribe, 4) Pacífico Centroamericano, 5) Transición Mexicano del Pacífico, 6) Golfo de California, 7) Pacífico Sudcaliforniano, y 8) Transición de la Bahía de Monterrey en el Pacífico. Modificada de: (CCA 2009).....	18
Figura 11. Ciclones tropicales en México, 1970-2017. Tomada de: (SEMARNAT 2019). .	19
Figura 12. Mediana de la potencia de oleaje (a) y viento (b). Modificada de: (Martínez et al. 2024).....	20
Figura 13. Duración de los eventos de El Niño.....	27
Figura 14. Duración de los eventos de La Niña.	27
Figura 15. Duración de los eventos neutros.	28
Figura 16. Malla espacial completa (izquierda) y delimitada (derecha).	30
Figura 17. Coeficiente de variación para la potencia de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f).	31
Figura 18. Ajuste lineal de la mediana de la potencia de oleaje durante la fase de El Niño para la coordenada (18°, -105°).....	32

Figura 19. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante El Niño. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).....	34
Figura 20. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante La Niña. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).....	36
Figura 21. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante la fase neutra. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).....	37
Figura 22. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y oleaje durante la fase de El Niño.	40
Figura 23. Clústeres por estadístico para El Niño. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.	42
Figura 24. Clústeres por estadístico para La Niña. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.	44
Figura 25. Clústeres por estadístico para la fase neutra. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.....	46
Figura 26. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante El Niño.	58
Figura 27. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase de El Niño.	59
Figura 28. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.....	59
Figura 29. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.....	60
Figura 30. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.	60
Figura 31. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.	61
Figura 32. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.	61
Figura 33. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.....	62

Tabla 1. Variables de la base de datos.....	21
Tabla 2. Cantidad y duración de los eventos del ENSO por fase.	28
Tabla 3. Análisis del ENSO por estaciones astronómicas.	29
Tabla 4. Periodos de análisis para la fase de El Niño.	29
Tabla 5. Periodos de análisis para la fase de El Niño (continuación).....	29
Tabla 6. Periodos de análisis para la fase de La Niña.....	30
Tabla 7. Periodos de análisis para la fase neutra.	30
Tabla 8. Extracto de los estadísticos para otoño de El Niño de 1951.....	32
Tabla 9. Rangos de variación por estadístico para las potencias de viento y de oleaje.	38
Tabla 10. Número de clústeres por caso de análisis.	40
Tabla 11. Registro histórico del ONI. Tomada de: (NOAA 2024b).	53
Tabla 12. Registro histórico del ONI (continuación). Tomada de: (NOAA 2024b).....	54
Tabla 13. Eventos de El Niño.	55
Tabla 14. Eventos de La Niña.....	56
Tabla 15. Eventos de la fase neutra.	57
Tabla 16. Eventos de la fase neutra (continuación).	58
Tabla 17. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante El Niño. 62	
Tabla 18. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante El Niño.	62
Tabla 19. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante El Niño.63	
Tabla 20. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante La Niña.63	
Tabla 21. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante La Niña.	64
Tabla 22. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante La Niña.64	
Tabla 23. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante la fase neutra.	65
Tabla 24. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante la fase neutra.65	
Tabla 25. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante la fase neutra.	65

I. Introducción

El clima marítimo es el conjunto de condiciones atmosféricas y oceánicas predominantes a largo plazo en los océanos, incluyendo factores como el régimen de viento y oleaje, la temperatura del aire y del agua, la radiación solar y la humedad. Las condiciones del clima marítimo se ven moduladas por fenómenos y factores a diferentes escalas temporales y espaciales; y la alteración de estas influye directamente en la dinámica de los ecosistemas marinos, así como en las actividades humanas (Hannon et al. 2016).

Las alteraciones del sistema océano-atmosfera se clasifican de dos formas: variabilidad y cambio climático. La primera se refiere a anomalías dentro de los patrones climáticos normales que ocurren en períodos relativamente cortos, como meses, años o décadas. Estas variaciones incluyen fenómenos como El Niño Oscilación del Sur, que genera cambios temporales en temperaturas, lluvias y patrones de viento. La variabilidad climática es, en este sentido, parte del funcionamiento natural del sistema climático, y suele revertirse o normalizarse en ciclos periódicos. Por otro lado, el cambio climático se refiere a alteraciones a largo plazo en los patrones promedio del clima, generalmente observables durante décadas o incluso siglos. Este cambio puede deberse a factores naturales, como variaciones en la radiación solar, o a factores antropogénicos, es decir, actividades humanas que intensifican el efecto invernadero, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación. A diferencia de la variabilidad climática, el cambio climático representa una modificación no lineal continua y progresiva en las condiciones promedio, lo cual puede llevar a transformaciones permanentes en el sistema océano-atmósfera, con efectos como el calentamiento global, la acidificación de los océanos y la alteración de los patrones de circulación del viento y del agua (CIIFEN 2022).

Las alteraciones a largo plazo del clima marítimo tienen implicaciones significativas tanto para el medio ambiente como para la sociedad. El cambio en las condiciones oceánicas y atmosféricas puede llevar a la extinción de especies, la destrucción de hábitats costero marinos y el debilitamiento de ecosistemas esenciales, como los arrecifes de coral, lo cual disminuye la resiliencia del océano y las costas frente a eventos extremos. En el ámbito social y económico, estas alteraciones plantean desafíos en sectores clave como la navegación, la pesca, la extracción de recursos naturales, la generación de energía renovable y la construcción de infraestructura costera. En particular, el desarrollo de energías renovables marinas, como la eólica offshore y la undimotriz, depende de un conocimiento detallado de las condiciones del entorno para optimizar el diseño y operación de sus sistemas (Allison et al. 2015). Asimismo, el diseño, construcción y mantenimiento de la infraestructura costera,

como rompeolas y puertos, requiere de estimaciones precisas de periodos y niveles de retorno que reflejen las condiciones de un clima cambiante (Cooley 2013), los cuales son cruciales para anticipar la magnitud y frecuencia de eventos extremos, asegurando que las estructuras sean capaces de resistir el impacto de oleajes intensos y el aumento del nivel del mar.

El estudio del clima marítimo y sus variaciones a largo plazo es, por lo tanto, fundamental para afrontar los desafíos que plantea el entorno cambiante de los océanos. La integración de este conocimiento en la planificación y gestión de actividades humanas en el ámbito marino no solo ayuda a mitigar riesgos y proteger el medio ambiente, sino que también fomenta un uso más eficiente y sostenible de los recursos naturales.

II. Objetivos

II.1. Objetivo general

Analizar la variabilidad del clima marítimo a largo plazo en la región oceánica adyacente a México (entre las longitudes -120° a -85° y las latitudes 14° a 33°) mediante la aplicación de técnicas de clustering al registro de las potencias de viento y oleaje durante el lapso de 1950 a 2022, segmentando la información en periodos característicos a cada fase del fenómeno de El Niño Oscilación del Sur.

II.2. Objetivos particulares

1. Definir la cantidad y duración de los periodos de análisis mediante el estudio del registro histórico del Oceanic Niño Index.
2. Calcular las potencias de viento y de oleaje durante los periodos definidos y obtener sus estadísticos representativos (mínimos, medianas y máximos).
3. Determinar la variación temporal de las potencias de viento y de oleaje en la región de estudio, utilizando como indicador de cambio la pendiente de la línea de tendencia de los estadísticos representativos.
4. Aplicar un análisis de clustering sobre las variaciones obtenidas para identificar regiones con patrones de comportamiento similar en las potencias de viento y de oleaje.

III. Marco teórico

III.1. Energía en el viento y oleaje

El viento y el oleaje, ambas manifestaciones del movimiento de masas de aire y agua que están estrechamente relacionadas, son dos fenómenos que tienen su génesis en la acción de diferentes fuerzas de la naturaleza en el terreno, los océanos y la atmósfera. Respecto a su origen, la atmósfera constantemente absorbe calor de forma directa a través de la radiación solar o indirectamente por procesos como la conducción, radiación y calor latente del terreno y océanos; a su vez, estos mecanismos se ven afectados por condiciones como la forma esférica de la Tierra, el ángulo de incidencia solar, la composición de los medios de transmisión y la reflectividad de las superficies, ocasionando incrementos diferenciales de temperatura y presión en la atmósfera que obligan al aire a transportarse de un punto a otro a través de corrientes conocidas como viento, el cual, al fluir sobre la superficie de un cuerpo de agua genera pequeñas ondas que se amplifican y aumentan su tamaño hasta convertirse en oleaje (Webb 2023).

Es atribuible a la forma de la Tierra que la radiación que se recibe del Sol se concentró en un mayor o menor área dependiendo de la latitud del planeta; esta relación de energía sobre superficie es máxima en el ecuador y disminuye en dirección a los polos (Figura 1a), donde se suma el fenómeno de reflexión, pues, el albedo ocasionado por el hielo y la nieve, aunado al ángulo con el que los rayos solares inciden, hace que parte de la energía solar recibida sea regresada al espacio, provocando que las latitudes cercanas al ecuador sean más cálidas, mientras que las más próximas a los polos sean más frías; en consecuencia y con aporte del efecto Coriolis, existen tres celdas de convección atmosférica en cada hemisferio (Figura 1b), dentro de las cuales hay una circulación de masas de aire entre regiones de baja presión (latitudes 0° y 60°), donde el aire cálido se eleva, se enfría y se dirige a través de la atmósfera superior hacia zonas de alta presión (latitudes 30° y 90°), donde desciende y regresa a su punto de partida, pero ahora sobre la superficie de la Tierra.

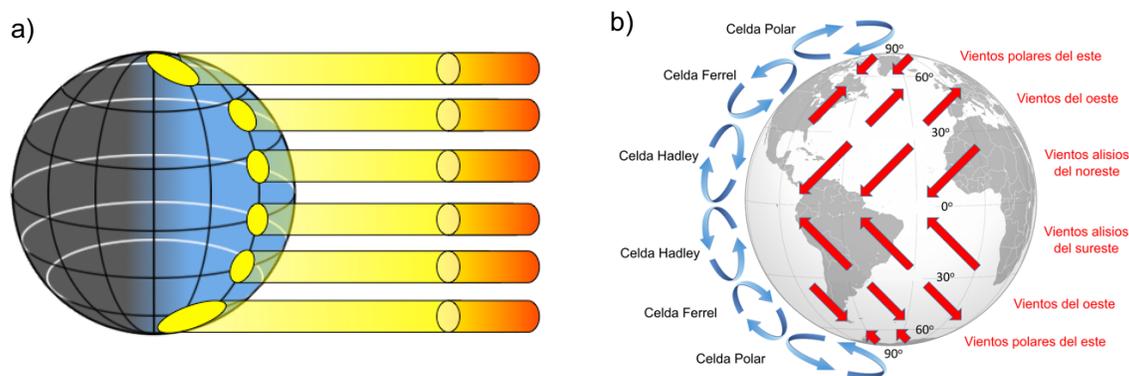


Figura 1. (a) Radiación solar en la superficie terrestre; (b) Celdas de convección atmosférica. Modificadas de: (Webb 2023).

En los océanos, por efecto del proceso descrito anteriormente, el viento transfiere parte de su energía al agua dando como resultado la formación de ondas de características diversas; las regiones donde ocurre este evento se conocen como zonas de generación o por su término en inglés, fetch. Por su origen, el oleaje puede clasificarse de dos formas, local y distante, el oleaje local se encuentra en las zonas de generación, se caracteriza por su irregularidad, debida a la falta de periodicidad; su asimetría, entre el valle y la cresta de las olas; y su gran peralte, considerando su proporción a la longitud de onda (Silva 2005), además, se propaga en diversas direcciones predominando la del viento. Por otro lado, el oleaje distante se presenta en las plataformas costeras, cuando las olas se alejan de las zonas de generación, por medio de la energía que les ha suministrado el viento; cuando han sido “filtradas”, por la dispersión angular y radial; y cuando se han fusionado por el fenómeno de soldadura entre olas con periodos similares, lo que da como resultado un oleaje más homogéneo con periodos y longitudes de onda prácticamente iguales. En profundidades reducidas la interacción del oleaje con el fondo provoca que este avance de forma paralela a la batimetría del sitio, adquiriendo la forma de la costa.

El viento puede ser descrito mediante varios parámetros, a continuación, se enlistan los más relevantes:

- **Velocidad del viento (w):** magnitud de la velocidad del aire en movimiento.
- **Dirección del viento (θ):** ángulo desde el cual proviene el viento, medido desde el norte en sentido horario.
- **Componente este del viento (u):** parte de la velocidad del viento que se dirige hacia el este, si el viento sopla hacia el oeste, esta componente será negativa.

- **Componente norte del viento (v):** parte de la velocidad del viento que se dirige hacia el norte, si el viento sopla hacia el sur, esta componente será negativa.

De forma equivalente al viento, el oleaje puede ser descrito por los siguientes parámetros (Figura 2):

- **Altura (H):** distancia vertical entre valle y cresta.
- **Longitud de onda (L):** distancia horizontal entre dos valles o crestas sucesivas.
- **Amplitud (a):** distancia vertical entre la cresta y el nivel medio del mar.
- **Profundidad (h):** distancia vertical entre el nivel medio del mar y el fondo del sitio donde se estudia el oleaje.
- **Pendiente del oleaje:** relación entre la altura y la longitud de la ola (H/L).
- **Periodo (T):** tiempo entre el paso de dos crestas sucesivas.
- **Frecuencia (f):** inverso del periodo de onda ($1/P$).
- **Celeridad (c):** velocidad de desplazamiento de la onda.

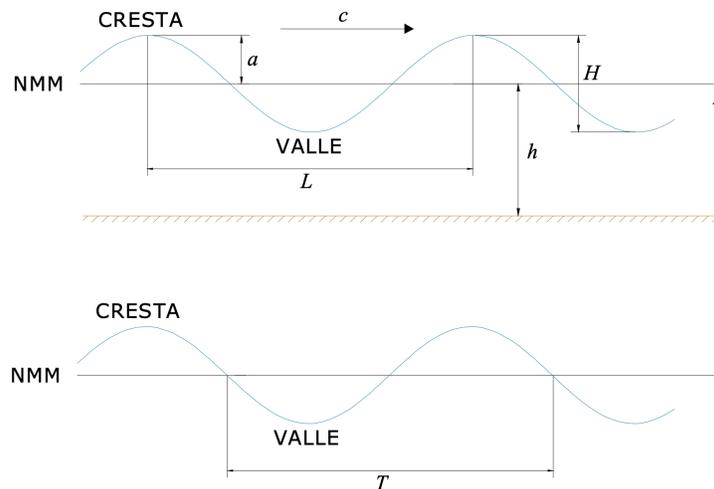


Figura 2. Parámetros descriptivos del oleaje. Tomada de: (Chávez 2011).

Visto de otra forma, el viento y el oleaje son dos fenómenos naturales capaces de transportar enormes cantidades de energía a través de grandes distancias en la atmósfera y los océanos. El potencial energético teórico de estos fenómenos se puede estimar utilizando principios físicos que consideran parámetros como los descritos anteriormente. Estas estimaciones

permiten determinar cuánta energía es posible extraer en una ubicación determinada para condiciones específicas. A continuación, se desarrollan las expresiones para cada caso.

Potencia de viento (P_{wind})

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho w^3 \quad (1)$$

donde

- ρ : densidad promedio del aire.
- w : velocidad del viento.

Potencia de oleaje (P_{wave})

$$P_{wave} = \frac{\rho g^2}{64\pi} T H^2 \quad (2)$$

donde

- ρ : densidad promedio del agua de mar.
- g : gravedad estándar.
- T : periodo de la ola.
- H : altura de ola.

Ambas expresiones son universales y solo requieren consistencia en las unidades de las variables sustituidas.

III.2. El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

El Niño Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) es un fenómeno natural que forma parte de la variabilidad climática. Consiste en la alteración de las interacciones del sistema océano-atmósfera en el Pacífico tropical y se compone por tres fases: una de condiciones normales, nombrada neutra; una cálida, conocida como El Niño; y una fría, llamada La Niña. El nombre del fenómeno tiene dos componentes: el término “El Niño” es la aportación histórica del reconocimiento empírico del evento en las costas de Perú donde fue asociada la aparición de aguas cálidas, en época de Navidad, con el Niño de Jesús

(CIIFEN 2022); mientras que “Oscilación del Sur” hace referencia al proceso físico detrás de este fenómeno, descrito como la variación de la presión atmosférica entre el Pacífico oriental y occidental, la cual induce el intercambio de masas de aire y agua entre ambos extremos (Trenberth 2019).

En el estado regular del Pacífico ecuatorial (fase neutra, Figura 3), corrientes superficiales de agua cálida son impulsadas desde América del sur hacia el sureste asiático debido al choque de los vientos alisios del noreste y sureste (Figura 1b); el desplazamiento de la capa superior del océano ocasiona que aguas profundas, frías y ricas en nutrientes se eleven creando zonas de surgencia de gran productividad pesquera en Sudamérica, lo que a su vez causa la disminución de la profundidad de la termoclina. La acumulación de agua caliente en el Pacífico occidental origina una región de baja presión, donde el aire cálido y húmedo asciende, forma nubes y ocasiona lluvias. Al alcanzar la capa superior de la tropósfera, el aire ascendido se desplaza hacia el este y desciende sobre el Pacífico oriental, cerca de las costas de Ecuador y Perú; este descenso crea una región de alta presión con condiciones secas en la zona. De esta manera, se establece un ciclo de circulación atmosférica conocido como la Celda de Walker (Webb 2023).

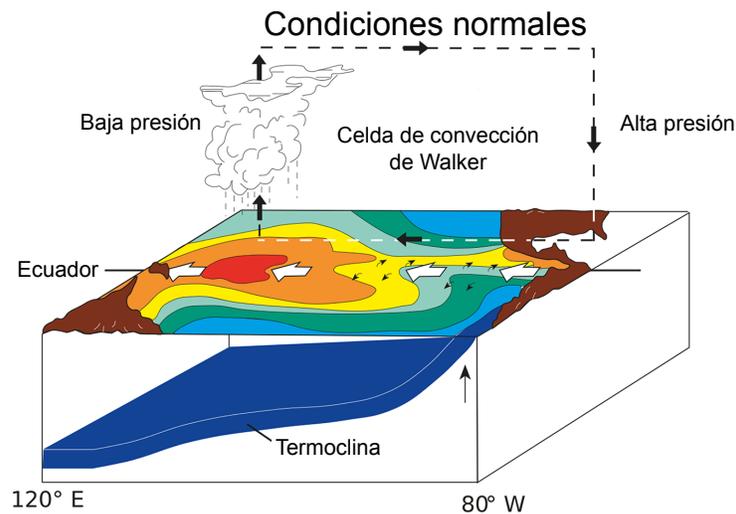


Figura 3. Representación gráfica de la fase neutra. Modificada de: (Webb 2023).

Por su parte, El Niño (Figura 4) ocurre cuando los vientos alisios pierden fuerza y las aguas cálidas del Pacífico ecuatorial comienzan a desplazarse hacia América del sur causando que la termoclina se vuelva más superficial en el oeste y más profunda al este, donde a su vez, la capa superior del océano es forzada hacia las profundidades cortando el suministro de agua fría y rica en nutrientes en un fenómeno conocido como hundimiento, el cual trae consigo una reducción significativa en la producción pesquera. El cambio en la circulación del agua

provoca alteraciones en la temperatura y humedad del aire haciendo que el sistema de baja presión que solía situarse sobre el Pacífico occidental se desplace al este sobre el ecuador y sea reemplazado por un sistema de alta presión que trae consigo condiciones áridas en el sureste asiático y Oceanía. En los eventos más intensos de esta fase, el sistema de baja presión se desplaza lo suficiente para llegar al continente americano, dejando atrás graves sequías y trayendo consigo fuertes lluvias e inundaciones (Webb 2023).

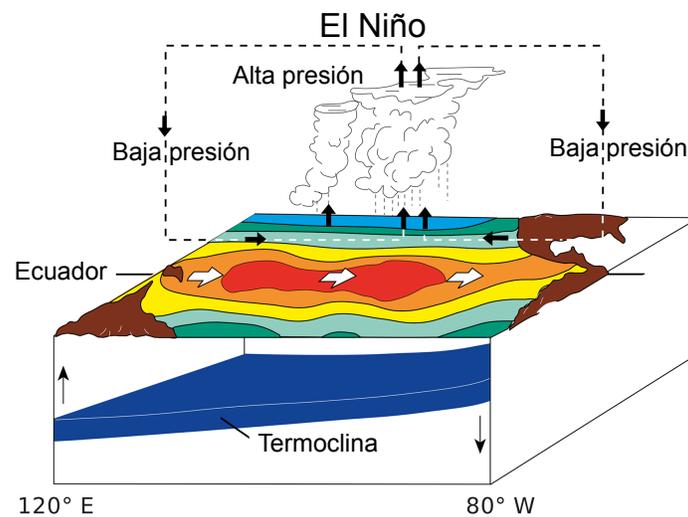


Figura 4. Representación gráfica de El Niño. Modificada de: (Webb 2023).

Por el contrario, cuando los vientos alisios se vuelven más fuertes aumenta la surgencia en las costas de América del sur lo que incrementa el transporte de agua fría a la superficie, adelgaza la termoclina en el este, la espesa al oeste y alimenta los sistemas de alta y baja presión en el Pacífico occidental y oriental, respectivamente. Esta fase se conoce como La Niña (Figura 5) y tiene los efectos contrarios a El Niño, alta humedad e inundaciones en el sureste asiático y Oceanía, y condiciones frías y secas en Sudamérica. El patrón de inversión de las condiciones entre ambos extremos del Océano Pacífico se conoce como Oscilación del Sur (Webb 2023).

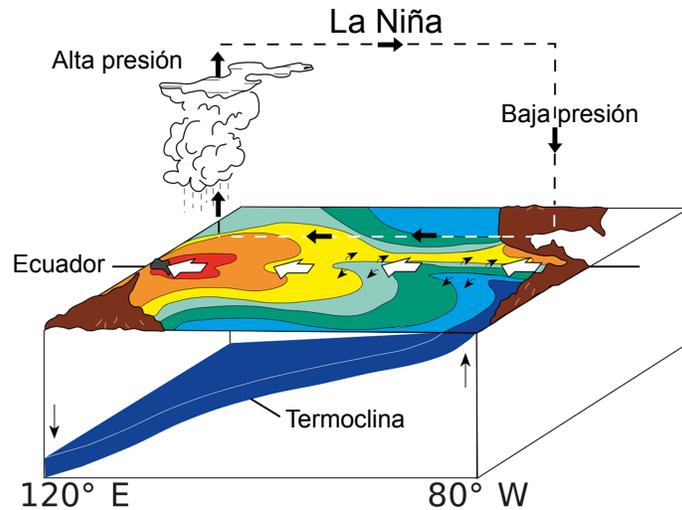


Figura 5. Representación gráfica de La Niña. Modificada de: (Webb 2023)

III.3. Índices de referencia del ENSO

Un índice es una escala numérica en la que los factores individuales esenciales para describir un fenómeno complicado se reducen a un solo número; ese número se puede rastrear a lo largo del tiempo, lo que puede ayudar a validar, actualizar o descartar su eficacia en el monitoreo según comparaciones con el comportamiento real del proceso de interés (NOAA 2015). Debido a que los efectos del ENSO tienen consecuencias diversas para las distintas regiones afectadas, no existe un consenso para determinar el inicio o fin de cada evento, más bien, se han desarrollado múltiples índices con consideraciones específicas según las necesidades de quien los maneja (por ejemplo, Raut et al. (2023) realizaron un estudio sobre la relación entre la duración del día y el ENSO a través de la serie de registros del *Multivariate ENSO Index Version 2*, mientras Campozano et al. (2014) emplearon el *Trans Niño Index* para identificar patrones de precipitación en Ecuador). A continuación, se presentan algunos de los índices más relevantes para el análisis del ENSO.

Southern Oscillation Index (SOI)

El SOI es el indicador más antiguo del estado del ENSO, se trata de una medida de las fluctuaciones a gran escala que ocurren entre el Pacífico tropical occidental y oriental durante los episodios de El Niño y La Niña. El índice se calcula en base a las diferencias de la presión atmosférica entre la isla de Tahití y la ciudad de Darwin en Australia. Los valores negativos del SOI se presentan cuando la presión atmosférica es anormalmente baja en Tahití y alta en

Darwin (Figura 6a); registros continuos de valores negativos sugieren condiciones cálidas asociadas con El Niño. Por el contrario, el índice es positivo cuando las presiones se encuentran invertidas (Figura 6b); registros continuos de valores positivos sugieren condiciones frías asociadas con La Niña. Finalmente, si el SOI se encuentra cerca de cero, las condiciones son neutrales (NOAA 2009).

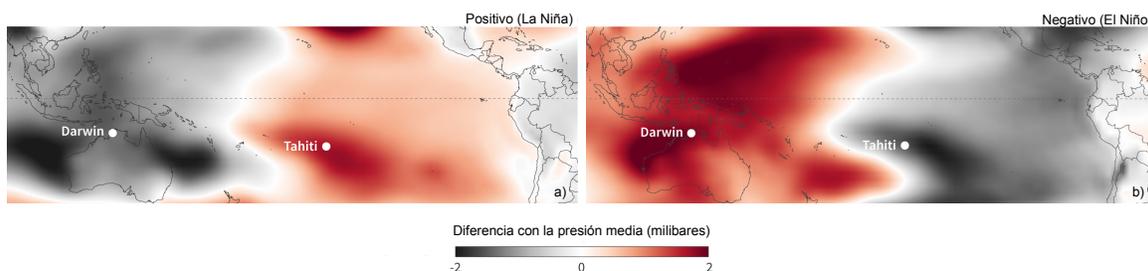


Figura 6. Patrones de presión durante El Niño (a) y La Niña (b). Modificada de: (NOAA 2009).

Las principales desventajas de este índice son que se calcula mediante las mediciones puntuales de solo dos estaciones, lo que lo vuelve susceptible a fluctuaciones de corto plazo, y que los sitios de análisis se encuentran al sur del Ecuador, impidiendo capturar con detalle el comportamiento del evento (NOAA 2015).

Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)

El MEI.v2 es una herramienta moderna y más robusta para evaluar el estado del ENSO, que, a diferencia de indicadores más simples como el SOI, no solo integra parámetros atmosféricos sino también oceánicos. Específicamente, las cinco principales variables observadas en la cuenca del Pacífico tropical (30°S-30°N y 100°E-70°W): presión atmosférica a nivel del mar, temperatura de la superficie del mar, componentes zonales y meridionales del viento superficial y radiación de onda larga saliente; todas integradas en una serie temporal mediante la principal componente de una función empírica ortogonal combinada (EOF, por sus siglas en inglés). Para capturar con mayor precisión la influencia del ENSO en diferentes épocas del año y reducir el impacto de variaciones de corto plazo que podrían distorsionar la interpretación del fenómeno, las EOFs se calculan para periodos bimensuales superpuestos, 12 por año, iniciando con la temporada de diciembre-enero y terminando con la de noviembre-diciembre. Valores positivos indican condiciones de El Niño, mientras que valores negativos señalan condiciones de La Niña (NOAA 2024b).

En la Figura 7 se presenta de manera gráfica la interacción de los mecanismos físicos detrás del MEI.v2 para la temporada noviembre-diciembre, basada en 11 episodios de El Niño y 11 de La Niña. Los centros de alta y baja presión atmosférica se señalan con las letras *H* y *L*,

respectivamente; la temperatura de la superficie del mar se muestra mediante un gradiente de color; las componentes del viento se simbolizan mediante vectores; y la radiación de onda larga saliente se representa con las líneas de contorno (NOAA 2024b).

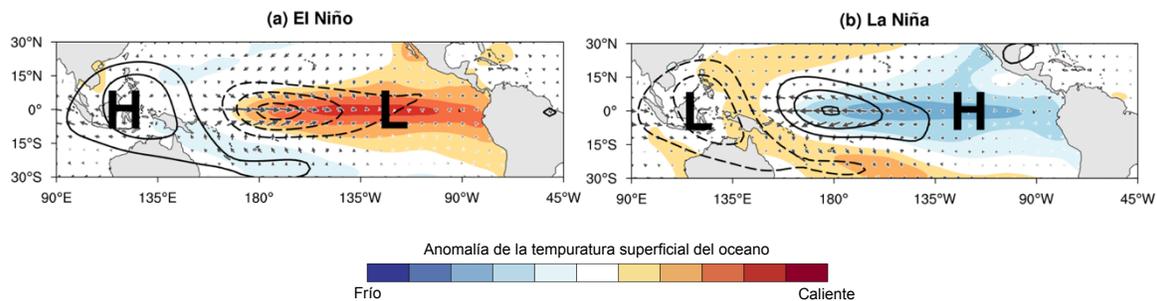


Figura 7. Interacción de los mecanismos físicos detrás del MEI.v2. Modificada de: (NOAA 2024b).

La principal desventaja de este índice se encuentra al momento de realizar análisis climatológicos históricos, pues, como su nombre lo dice esta es la segunda versión del indicador, por lo que su cálculo varía respecto a la primera. Dicho esto, los valores de MEI.v2 no son directamente comparables con los de MEI, por lo tanto, el registro original desde 1950 hasta 2018, no se puede acoplar con la versión moderna de 1979 hasta la actualidad.

Oceanic Niño Index (ONI)

El ONI es un criterio basado en las anomalías de la temperatura superficial del mar en la región del Niño 3.4, en el Pacífico ecuatorial central y oriental, que se extiende entre las longitudes -170° a -120° y las latitudes -5° a 5° . En este caso, una "anomalía" se define como la diferencia, positiva o negativa, de al menos 0.5°C del promedio de la temporada respecto a su promedio base asociado. Para definir un evento del ENSO, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) utiliza como criterio la ocurrencia de cinco anomalías consecutivas y superpuestas del ONI, con valores positivos para El Niño y negativos para La Niña. El registro histórico del índice puede encontrarse en el portal digital del Climate Prediction Center (NOAA 2024a), donde además, los eventos de larga duración están señalados con colores: azul para la fase fría y rojo para la cálida.

Las temporadas se componen de 3 meses continuos, donde el segundo mes de una se superpone con el primer mes de la siguiente, por ejemplo: diciembre-enero-febrero y enero-febrero-marzo. Por su parte, los promedios base se obtienen para periodos de 3 décadas que se actualizan cada 5 años en los cálculos del ONI, de esta forma, de 1950 a 1955, se utiliza el período base de 1936 a 1965, mientras que de 1956 a 1960, se utiliza el período de 1941 a 1970. Para los cálculos en los años más recientes, donde aún no existe un período base, se

utiliza el período inmediato anterior y una vez se completan los registros necesarios para generar el nuevo período base es necesario recalcular todos los valores del ONI asociados a este, por lo que pueden esperarse variaciones mínimas en el registro histórico (NOAA 2013).

El principal atractivo del ONI sobre el resto de los índices es su capacidad para adaptarse al cambio climático. Como puede observarse en la Figura 8, los promedios base más recientes son considerablemente mayores a los más antiguos, de no ser así, al hacer uso de un solo promedio a largo plazo, el Pacífico tropical parecería estar permanentemente en un evento de El Niño y no sería posible identificar episodios de La Niña. Como consecuencia del calentamiento global cada vez los océanos son más cálidos, y en lugar de desaparecer, el ENSO se ha acoplado a estos cambios.

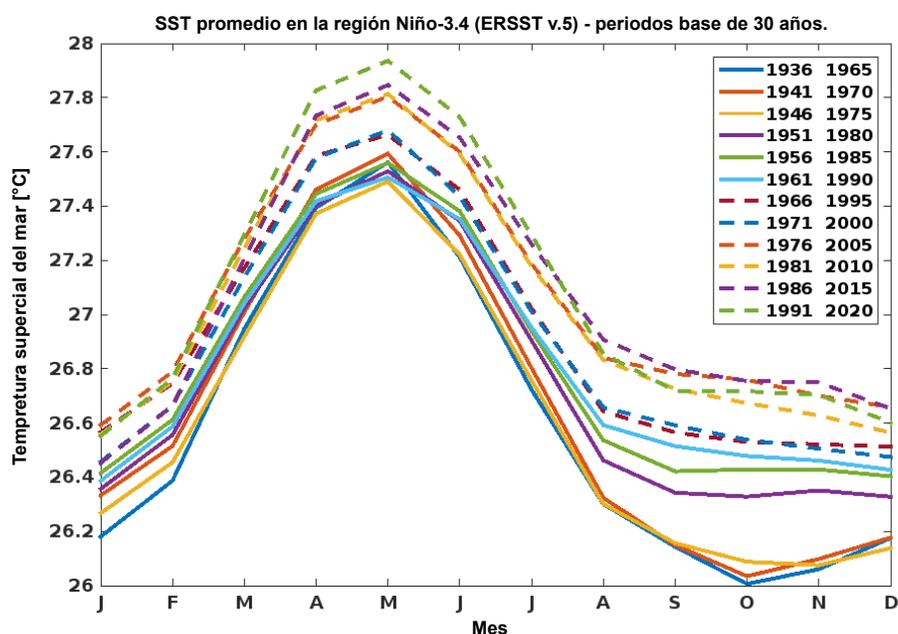


Figura 8. Promedios base de la temperatura superficial del mar. Modificada de: (NOAA 2017).

Adicionalmente, Odériz et al. (2020) analizaron la interacción del ONI con el clima marítimo en las costas de México. Se determinó que en la costa norte y central del Pacífico la potencia de oleaje aumenta durante El Niño y disminuye durante La Niña; que a lo largo de la costa sur la potencia de oleaje disminuye durante El Niño y aumenta durante la Niña; y que en la costa del Caribe la potencia de oleaje tiene poca respuesta ante el ENSO.

III.4. Clustering

El clustering es una técnica estadística multivariante que divide un conjunto de datos en varios grupos, llamados clústeres, de forma que los elementos dentro de cada clúster sean lo más similares entre sí, y al mismo tiempo, lo más diferentes del resto (Han et al. 2012). Es especialmente útil para analizar y clasificar grandes volúmenes de información, identificando relaciones entre sus componentes y reduciendo la complejidad de los datos al generar conjuntos más manejables y comprensibles, lo que lo convierte en una herramienta valiosa en el análisis exploratorio de datos. Dado que existen numerosos algoritmos de clustering, resulta complicado describir cada uno en detalle, en su lugar, conviene analizar sus principales enfoques, los cuales pueden ser clasificados en las siguientes categorías (Han et al. 2012):

- **Métodos de partición:** son aquellos que dividen un conjunto de n elementos en k particiones, de igual relevancia, de forma que cada una contenga al menos un objeto. La mayoría de los métodos de partición se basan en la distancia entre sus componentes, por lo que esta se vuelve el principal criterio para definir la calidad de la agrupación, adicionalmente, suelen adoptar una separación exclusiva de clústeres, donde cada elemento debe pertenecer únicamente a un grupo.
- **Métodos jerárquicos:** estos métodos organizan la información en estructuras que permiten que los clústeres se compongan o descompongan en otros. Se dividen en dos enfoques: en el enfoque aglomerativo, cada objeto comienza formando un clúster individual y se va fusionando progresivamente con otros clústeres hasta que todos los elementos pertenecen a un único grupo, o hasta que se cumple una condición de parada; en contraste, el enfoque divisivo inicia con todos los objetos en un solo clúster, que se va dividiendo en grupos más pequeños hasta que cada elemento forma su propio clúster o se alcanza una condición de parada.
- **Métodos basados en densidad:** estos métodos forman y expanden clústeres siempre y cuando el número de puntos alrededor de cada elemento en estos supere un umbral dado. A diferencia de los métodos de partición, que detectan clústeres esféricos, los métodos basados en densidad pueden identificar grupos con formas arbitrarias los cuales pueden seguir una estructura de separación exclusiva o jerárquica. Estos, a su vez, son efectivos para filtrar ruido y valores atípicos, con la desventaja de que los puntos que no cumplen con los criterios de densidad mínima pueden quedar descartados a pesar de que podrían tener algún valor informativo.

- **Métodos basados en cuadrículas:** estos cuantizan el espacio de datos en un número finito de celdas, creando una estructura de cuadrícula en la cual se realizan todas las operaciones necesarias. Al restringir los valores continuos de las variables a un conjunto de valores discretos, este enfoque simplifica y acelera el procesamiento de los datos, ya que la rapidez del procesamiento depende principalmente del número de celdas en cada dimensión del espacio cuantizado, y no del número total de objetos en el conjunto. Los métodos basados en cuadrículas pueden integrarse con otros métodos de clustering, como los basados en densidad y los jerárquicos.

Cada algoritmo de clustering presenta sus propias complicaciones, pero de forma general el uso de estas técnicas requiere particular atención sobre el conocimiento general de la estructura de los datos, los parámetros de entrada, las restricciones del mundo real sobre las agrupaciones, la capacidad de cómputo, la interpretación de los resultados y la capacidad de integrar nuevos registros en cualquier momento.

III.4.1. K-means

El algoritmo K-means es un método iterativo de partición que optimiza la distancia euclidiana entre los elementos de un conjunto de datos y el centroide del clúster al que pertenecen. El centroide de un clúster se define como el valor medio de todos los puntos que lo conforman, los cuales al inicio del proceso son desconocidos, por lo que el primer paso de la técnica es establecerlos.

Dado un conjunto de datos D y un número predefinido de clústeres k , se seleccionan aleatoriamente k objetos en D para convertirse en los centroides de la primera iteración, los puntos restantes son asignados al clúster más cercano calculando la distancia de cada uno a los k centroides definidos. Cada objeto en el conjunto de datos está descrito por p variables, también llamadas atributos o dimensiones, de forma que la distancia euclidiana entre dos puntos en este espacio, $c_1(x_1, x_2, \dots, x_p)$ y $c_2(y_1, y_2, \dots, y_p)$, se calcula mediante la siguiente fórmula

$$\text{dist}(c_1, c_2) = \sqrt{(y_1 - x_1)^2 + (y_2 - x_2)^2 + \dots + (y_p - x_p)^2} \quad (3)$$

Para cada clúster formado se calcula la media de los atributos de sus puntos, se actualiza su centroide y se reasignan todos los objetos del conjunto a su nuevo clúster más cercano. Este proceso se repite hasta que la asignación de puntos se estabilice, es decir, cuando los grupos formados en la iteración actual coincidan con los de la iteración anterior (Figura 9).

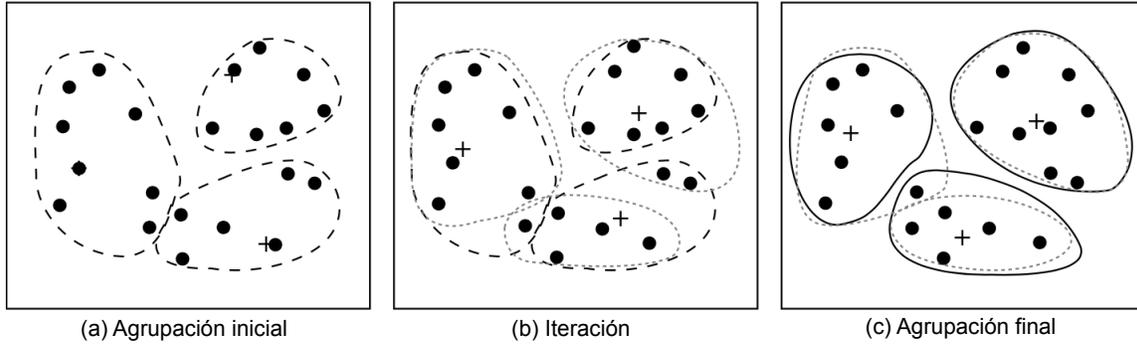


Figura 9. Clustering de un conjunto de objetos utilizando el método K-means (el centroide de cada clúster se indica con +). Modificada de: (Han et al. 2012).

Como resultado de este algoritmo, se obtienen k nuevos puntos correspondientes a los centroides de cada clúster, y a cada objeto del conjunto se le asigna un nuevo atributo que indica su pertenencia a uno de los grupos.

III.4.2. Coeficiente de silueta

El coeficiente de silueta es un método para cuantificar la calidad de un análisis de agrupación. En específico, este se clasifica como un método intrínseco o “no supervisado” ya que no existe una *verdad fundamental* para comparar los resultados, en cambio, se evalúa cómo de compactos y qué tan bien definidos están los clústeres. Para cada objeto o de un conjunto D , de n datos, que ha sido dividido en k clústeres, C_1, \dots, C_k , se puede calcular $a(o)$ como la distancia promedio entre o y el resto de los objetos del clúster al que pertenece, de igual forma, se puede evaluar $b(o)$ como la distancia promedio mínima desde o a todos los clústeres a los que no pertenece. Entonces, para un objeto o en el clúster C_i

$$a(o) = \frac{\sum_{o' \in C_i, o' \neq o} \text{dist}(o, o')}{|C_i| - 1} \quad (4)$$

y

$$b(o) = \min_{C_j: 1 \leq j \leq k, j \neq i} \left\{ \frac{\sum_{o' \in C_j} \text{dist}(o, o')}{|C_j|} \right\} \quad (5)$$

El parámetro $a(o)$ indica la compacidad de o en el grupo al que pertenece, y cuanto más pequeño sea este valor, más compacto será su clúster. Por otro lado, $b(o)$ mide cuán distante es o del resto de grupos, y mientras más grande sea su valor, más alejado de ellos estará.

Así, el coeficiente de silueta para cualquier punto o se define como

$$s(o) = \frac{b(o) - a(o)}{\max\{a(o), b(o)\}} \quad (6)$$

El coeficiente de silueta varía entre -1 y 1, donde los valores cercanos a 1 indican que el objeto en cuestión está bien agrupado, es decir, que se encuentra dentro de un clúster compacto y bien separado de otros, sugiriendo que su clasificación fue adecuada. Por el contrario, los valores cercanos a -1 revelan que el objeto está más próximo a los elementos de otros clústeres que a los de su propio grupo, lo cual indica una mala clasificación. Un valor cercano a 0 sugiere que el objeto se encuentra en el límite entre dos clústeres, lo que puede denotar ambigüedad en la clasificación.

El promedio del coeficiente de silueta de todos los objetos en un conjunto de datos ofrece una medida de la calidad de la agrupación hecha para un número dado de clústeres, k . Por lo tanto, esta métrica puede utilizarse para determinar de forma heurística el número adecuado de grupos en un análisis de clustering (Han et al. 2012). De las alternativas evaluadas, la mejor será aquella que obtenga el promedio más cercano a 1.

IV. Materiales y métodos

IV.1. Zona de estudio

México se distingue por su extenso litoral, que abarca 12,018 kilómetros de costa continental y 3,051 kilómetros de costa insular (CONABIO 2018). Esta vasta franja costera expone al país a dos importantes cuencas oceánicas: el océano Pacífico, al oeste; y el océano Atlántico, al este, de los cuales la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte (CCA) ha dividido los mares mexicanos en ocho ecorregiones dentro de la Zona Económica Exclusiva (ZEE), tal como se muestra en la Figura 10. La relación entre los océanos y la superficie terrestre se expresa en una proporción del 65% marítima frente al 35% terrestre, lo que resalta la importancia de los recursos marinos para el país.

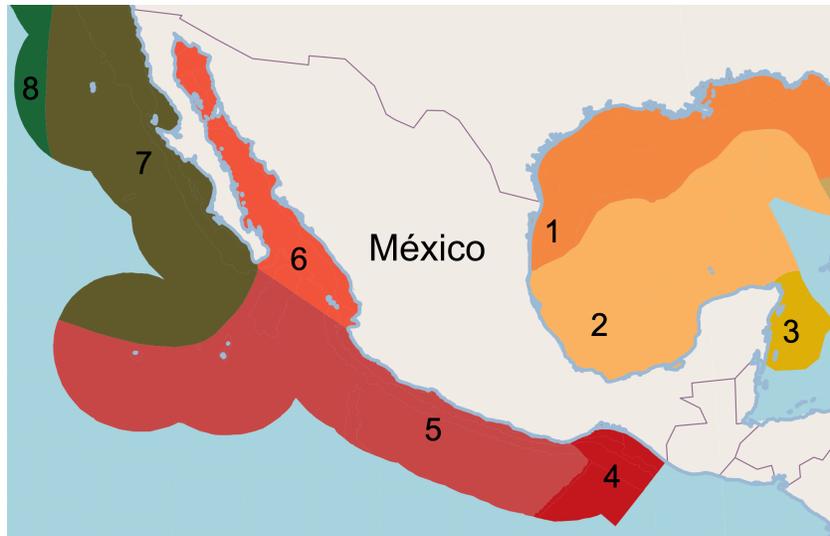


Figura 10. Ecorregiones marinas de México. 1) Norte del Golfo de México, 2) Sur del Golfo de México, 3) Mar Caribe, 4) Pacífico Centroamericano, 5) Transición Mexicano del Pacífico, 6) Golfo de California, 7) Pacífico Sudcaliforniano, y 8) Transición de la Bahía de Monterrey en el Pacífico. Modificada de: (CCA 2009).

El Trópico de Cáncer divide a México en dos grandes zonas climáticas: una región tropical, caracterizada por alta humedad al sur, y una región templada y árida al norte (SEP 2011). Estas características tienen un impacto directo en la incidencia de fenómenos meteorológicos extremos, en particular los ciclones tropicales. La región tropical, por su clima cálido y húmedo, facilita la formación y desarrollo de estos fenómenos, mientras que la región templada, aunque menos propensa a su generación, no está exenta de sus efectos, especialmente durante transiciones estacionales o cuando los ciclones se desplazan hacia el norte. La Figura 11 ofrece una representación gráfica de los ciclones tropicales que han afectado a México entre 1970 y 2017, clasificados según la escala Saffir-Simpson. Aunque no incluye eventos recientes como el huracán Otis, que impactó las costas de Guerrero en

octubre de 2023, sigue siendo una herramienta valiosa para comprender los patrones históricos de los ciclones en la región. En el mapa se observa que 10 de los 22 ciclones de categoría 3, o superior, que tocaron tierra en México lo hicieron en la costa del Pacífico, lo que indica una mayor vulnerabilidad de esta zona ante dichos fenómenos.

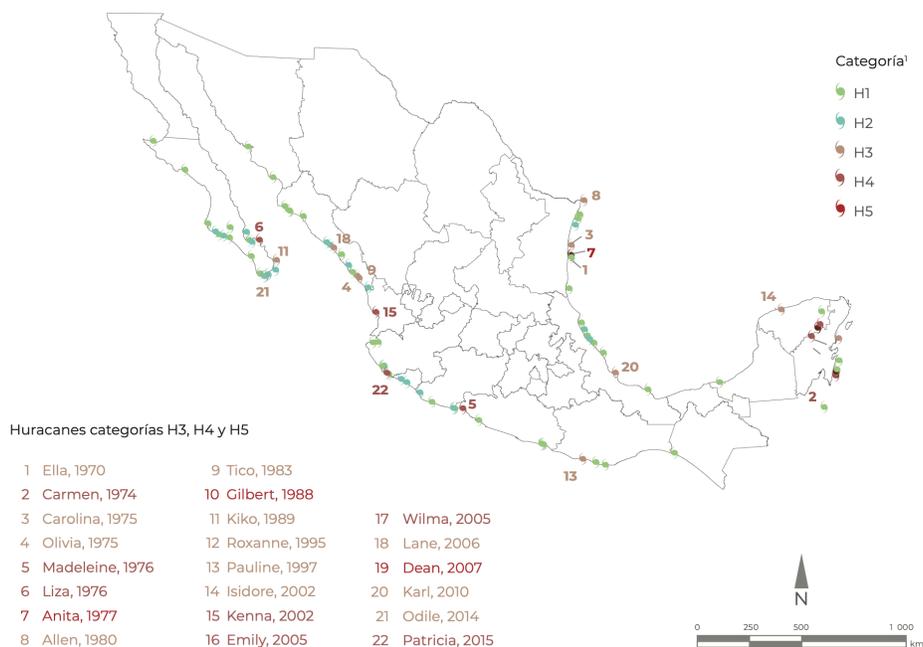


Figura 11. Ciclones tropicales en México, 1970-2017. Tomada de: (SEMARNAT 2019).

Respecto a las potencias de viento y de oleaje, Martínez et al. (2024) presentaron su variación en el litoral mexicano entre los años 1940 y 2022. En la Figura 12a se observa que, con excepción del Mar de Cortés, las costas del Pacífico poseen los valores más elevados para la mediana de la potencia de oleaje, en un rango entre 12 y 22 kW/m. En contraste, las costas del Golfo de México y la Península de Yucatán no superaron los 4 kW/m, indicando una menor energía undimotriz en estas zonas. Por otro lado, la Figura 12b destaca la costa fronteriza de Tamaulipas, parte de la península de Baja California y la península de Yucatán como las zonas con los mayores valores para la mediana de la potencia de viento, solo por detrás del sur del Istmo de Tehuantepec, con registros de aproximadamente 0.25 kW/m²; mientras el resto de las costas no superó los 0.10 kW/m².

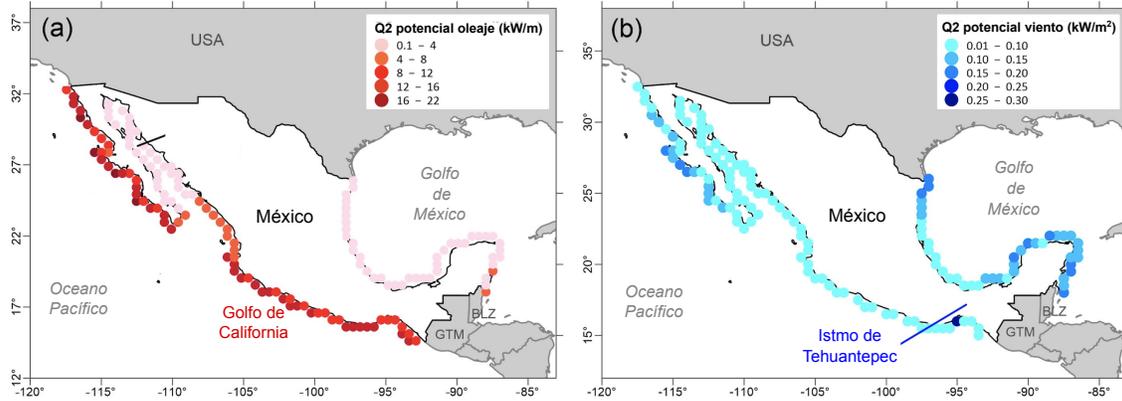


Figura 12. Mediana de la potencia de oleaje (a) y viento (b). Modificada de: (Martínez et al. 2024).

IV.2. Base de datos

Los datos empleados para este estudio provienen del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), un organismo intergubernamental especializado en la generación de información meteorológica a escala global (Blanchonnet 2022). El acceso a los registros es de carácter público y solo requiere de la creación de una cuenta en el Copernicus Climate Data Store (CDS), servicio donde se encuentran alojados.

La información en cuestión fue generada por ERA5, un sistema de reanálisis que busca crear una representación detallada y coherente del clima pasado, mediante la asimilación de datos, al combinar modelos numéricos con registros de observaciones históricas globales (C3S 2018). ERA5 es la quinta versión de este sistema y ofrece significativas mejoras sobre su predecesor inmediato, ERA-Interim, de las cuales destaca un notable avance en resolución temporal, espacial y en la cantidad de variables disponibles.

ERA-Interim poseía datos desde enero de 1979 hasta agosto de 2019, en intervalos de 6 horas. Por su parte, ERA5 ofrece valores horarios desde enero de 1940 hasta la actualidad, dando como resultado 83 años ininterrumpidos de registros que comenzaron a ser publicados en septiembre de 2020. Por su parte, la resolución espacial aún varía en función del tipo de parámetro, pero esta pasó de 0.75° y 1.0° a 0.25° y 0.5° para variables atmosféricas y oceánicas, respectivamente (C3S 2018).

La base de datos para este proyecto fue recopilada a inicios del año 2023 con la siguiente estructura:

- **Temporalidad:** datos horarios desde enero de 1940 hasta diciembre de 2022 (82 años de registros).

- **Malla espacial:** de las longitudes -120° a -85° a las latitudes 14° a 33° , en intervalos homogéneos de 0.5° en ambas direcciones.
- **Variables:** ver Tabla 1.

Tabla 1. Variables de la base de datos.

Variable	Unidad	Nombre corto	Tipo
Altura de ola significativa	[m]	H_s	Oceánico
Periodo pico	[s]	T_p	Oceánico
Componente vertical del viento a 10 metros	[m/s]	v_{10}	Atmosférico
Componente horizontal del viento a 10 metros	[m/s]	u_{10}	Atmosférico
Módulo de la velocidad del viento	[m/s]	w	Atmosférico

A continuación, se describen las variables de la Tabla 1.

- **Altura de ola significativa:** corresponde al parámetro de ERA5 “Significant height of combined wind waves and swell” (swh); representa la altura media, de la distancia vertical entre la cresta y el valle de la ola, del tercio más alto de las olas superficiales del océano. El campo de olas superficiales consiste en una combinación de olas con diferentes alturas, longitudes y direcciones (conocido como el espectro de olas bidimensional); el espectro de olas se puede descomponer en locales y distantes. Este parámetro tiene en cuenta ambas. Específicamente, este parámetro es cuatro veces la raíz cuadrada de la integral en todas las direcciones y todas las frecuencias del espectro de olas bidimensional (C3S 2018).
- **Periodo pico:** corresponde al parámetro de ERA5 “Peak wave period” (pp1d), representa el período de las olas oceánicas más energéticas generadas por los vientos locales y asociadas al oleaje. El período de las olas es el tiempo promedio que tardan dos crestas de olas consecutivas en pasar por un punto

fijo de la superficie del océano. Este parámetro se calcula a partir del recíproco de la frecuencia correspondiente al valor más grande (pico) del espectro de olas de frecuencia. El espectro de olas de frecuencia se obtiene integrando el espectro de olas bidimensional en todas las direcciones. Al igual que la altura de ola significativa, considera el oleaje local y distante (C3S 2018).

- **Componente horizontal del viento a 10 metros:** corresponde al parámetro de ERA5 “10m u-component of wind” (u10); es la velocidad horizontal del aire que se mueve hacia el este, a una altura de diez metros sobre la superficie de la Tierra (C3S 2018).
- **Componente vertical del viento a 10 metros:** corresponde al parámetro de ERA5 “10m v-component of wind” (v10), es la velocidad horizontal del aire que se mueve hacia el norte, a una altura de diez metros sobre la superficie de la Tierra (C3S 2018).
- **Módulo de la velocidad del viento:** calculada para cada instante del registro como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las componentes horizontal y vertical del viento a 10 metros.
- **Formato:** dos archivos NetCDF por año, uno para variables atmosféricas y otro para variables oceánicas.

IV.3. Periodos de análisis

Para poder analizar el clima marítimo incorporando variación a escala interanual a mediano plazo, se decidió definir los periodos de análisis tomando como referencia el ENSO. Mediante la inspección del registro histórico del ONI, entre los años 1950 y 2022, se llevó a cabo un estudio sobre la cantidad de episodios, persistencia e intensidad de cada fase.

Para identificar un evento de El Niño o La Niña, se siguieron los criterios establecidos por la NOAA, que consideran tanto el umbral como la continuidad del ONI. Por otro lado, se clasificaron como eventos neutros a aquellos periodos que no entraron en ninguna de las otras fases, sin importar su persistencia o intensidad. Respecto a la duración de cada evento, esta se determinó tomando en cuenta únicamente los meses centrales de cada temporada (por ejemplo, un evento que comenzó en el trimestre enero-febrero-marzo y terminó en julio-agosto-septiembre del mismo año se consideró de siete meses, y no de nueve, ya que se excluyó a enero y septiembre); esta medida se adoptó para evitar inconsistencias con la extensión del registro histórico del ONI.

IV.4. Delimitación de la región de estudio

Debido a que la base de datos contenía registros para cada coordenada en la malla espacial sin hacer distinción entre sitios en agua y tierra, fue necesario delimitar la región de estudio. En este contexto, un punto en agua puede identificarse como aquel que presenta registros de valores numéricos tanto para los parámetros atmosféricos como para los oceánicos, mientras que un punto en tierra conserva los atmosféricos, pero presenta valores no numéricos (NaN, por sus siglas en inglés) en los oceánicos.

Dadas las características del proyecto se optó por trabajar en Python, un lenguaje de programación eficiente, flexible y con una gran disponibilidad de bibliotecas enfocadas a la gestión y análisis de bases de datos. El primer paso fue generar una lista exhaustiva de las coordenadas del dominio; posteriormente, se corroboró punto por punto que estos contuvieran registros válidos para ambos tipos de parámetros y cuando alguno no cumplía con esta condición era eliminado de la lista. Adicionalmente, se identificó que algunas ubicaciones en tierra, principalmente en las zonas cercanas a la línea de costa, también poseían registros numéricos de oleaje. Esta inconsistencia fue atribuida a problemas con la resolución del reanálisis de ERA5 y para solucionarla fue necesario recurrir a herramientas visuales eliminando manualmente dichos sitios

IV.5. Estadísticos representativos

Las series temporales de los periodos indicados de la Tabla 4 a la Tabla 7 representan un total de 1,511,172,936 datos (considerando 7 atributos por celda: *Año, mes, día, hora, P_{wind} y P_{wave}*). Por este motivo, y dado que la variabilidad es parte inherente del sistema analizado, el análisis de los datos se realizó mediante cuatro estadísticos representativos de la potencia de viento y oleaje: promedio (media), valor central (mediana) y valores extremos (mínimo y máximo). El valor mínimo y máximo del registro de potencias reflejan las condiciones de menor y mayor intensidad, respectivamente, asociadas a periodos de calma y fenómenos extremos como ciclones tropicales. Por otro lado, la mediana se seleccionó como un indicador de tendencia central, ya que refleja el comportamiento típico de los datos en términos de su frecuencia y es menos sensible a la variación que el promedio.

IV.6. Variación temporal de la potencia de viento y oleaje

En la agrupación de un conjunto de datos, a pesar de que cualquier atributo puede ser usado con el mismo fin, las variables espaciales y temporales juegan un papel adicional a la

integración de los clústeres, pues, a menudo son empleadas para representar los resultados del análisis de forma gráfica. Una representación visual de dos dimensiones, como la mostrada en la Figura 9c, es particularmente útil en casos donde los clústeres formados tienen una interpretación espacial sencilla, como un mapa de actividad sísmica donde las abscisas y ordenadas son la latitud y longitud. Mientras un formato bidimensional muestra a los clústeres como “manchas”, uno tridimensional lo hace como “nubes”, pues, mediante una tercera dimensión es posible visualizar el comportamiento de los grupos a razón del cambio de esta. Si la dimensión en cuestión es el tiempo, se puede describir a detalle la evolución de los clústeres durante el lapso y región definida para el análisis. Sin embargo, un análisis espaciotemporal es poco práctico para comparar distintos eventos entre sí, pues, la cantidad de grupos y sus características varían para cada uno. En este sentido, la caracterización de los periodos mediante los estadísticos seleccionados no solo disminuyó la cantidad de datos significativamente y mejoró los tiempos de procesamiento, sino que simplificó la componente temporal de cada periodo, permitiendo centrar el estudio a las variaciones de las potencias de periodo a periodo, y no dentro de cada uno.

Para este estudio, la variación de las potencias a lo largo del tiempo se describió mediante la pendiente de su línea de tendencia, calculada para cada coordenada dentro de la malla delimitada, para los estadísticos considerados. Este proceso se replicó para cada fase del ENSO, obteniendo tres mallas de información. En cada malla, se señaló la tasa de crecimiento de los estadísticos asociados para cada coordenada.

IV.7. Clustering de la información

Para implementar el análisis de clustering al conjunto de datos fue necesario definir la cantidad de estudios, así como las variables y estadísticos que los compondrían. Para esto, se conservó la clasificación por fase del ENSO, dando como resultado tres principales grupos: El Niño, La Niña y fase neutra. Además, dada la estrecha relación entre los fenómenos asociados al viento y oleaje, se optó por abordar estos de forma simultánea y no en análisis separados, de modo que cada coordenada de la malla delimitada se caracterizó por sus componentes espaciales (latitud y longitud) así como sus potencias de viento y de oleaje. Ya que estas últimas fueron descritas por tres estadísticos se terminó con una clasificación de dos niveles: por fase y por estadístico. Nueve casos de estudio en total.

El siguiente paso fue definir el número de clústeres por caso, particularmente importante por su participación como dato de entrada en el algoritmo K-means, pero también, porque la cantidad apropiada de clústeres determina el nivel de detalle con el que se agrupan los datos.

Un número adecuado de grupos asegura que el análisis no sea ni muy general (con pocos clústeres, donde se agrupan datos dispares), ni muy detallado (con demasiados clústeres, dividiendo datos similares innecesariamente). A pesar de que existen muchas formas de estimar el número de grupos, las más sencillas y populares ofrecen resultados que en ocasiones pueden considerarse ambiguos y subjetivos, pues, al involucrar la percepción del analista vuelven difícil mantener la consistencia a lo largo de múltiples casos de estudio; el más popular de estos es el *método del codo*. Establecer el número de grupos depende en gran medida de las características del conjunto de datos, lo que puede causar que, en los primeros acercamientos, cuando estas propiedades son desconocidas, sea bastante complicado identificar un punto de partida. En situaciones como estas, se recurre a medidas de calidad de agrupación como el método de la silueta.

Para cada caso de estudio se calculó el coeficiente de silueta para un rango de uno a diez clústeres y de los valores obtenidos se seleccionó el óptimo como aquel de mayor magnitud. Una vez definido el número de grupos, se llevó a cabo el análisis de clustering mediante una rutina de Python haciendo uso de la librería scikit-learn. A través del comando *KMeans* se ejecutó una variación del método conocida como K-means++, la cual reemplaza la forma original de elegir los centroides de la primera iteración por una que ofrece mejor calidad de clústeres y tiempos de convergencia. Esta variante del algoritmo selecciona el primer centroide de manera aleatoria, pero, a partir del segundo y hasta el último, lo hace determinando el punto más lejano a los centroides ya definidos, lo que asegura que los grupos sean lo más distintos posible desde el inicio. Para garantizar la replicabilidad de los resultados entre ejecuciones, así como permitir la comparación entre casos, se definió una semilla general de 50, la cual es un valor numérico usado como punto de partida para generar la secuencia de números aleatorios empleados en el algoritmo. Adicionalmente, dado que las variables involucradas tenían diferentes unidades de medida, existía la posibilidad de que los resultados se vieran sesgados. Esto se debe a que, en métodos de partición basados en distancias, las variables con valores de mayor magnitud tienden a influir de manera significativa en la determinación de la pertenencia de los elementos a un clúster. Como consecuencia, las variables más grandes podrían dominar el proceso de agrupación, restando importancia a las variables de menor magnitud, independientemente de la relevancia de los atributos sobre los objetivos del análisis. Para solucionar esto, todos los datos fueron estandarizados antes de someterse al algoritmo y posteriormente fueron devueltos a su formato original.

De este proceso se obtuvieron dos grupos de archivos: el primero, con la asignación de cada coordenada de la malla delimitada a algún clúster de su conjunto asociado, por fase y estadístico; el segundo, con los centroides de los clústeres identificados por caso de estudio.

V. Resultados y discusión

V.1. Periodos analizados y región de estudio

A lo largo del registro histórico, se identificaron 23 eventos de El Niño y 19 eventos de La Niña (excluyendo el del año 1950 debido a la falta de información previa), con una duración media de 10.04 y 12.84 meses, respectivamente. Adicionalmente, se identificaron 42 eventos Neutros, con una duración media de 9.38 meses. El evento de El Niño más prolongado se extendió por 19 meses, desde octubre de 2014 hasta abril de 2016, mientras que el evento más largo de La Niña duró 32 meses, entre julio de 1998 y febrero de 2001. En cuanto a los eventos Neutros, el más grande abarcó desde abril de 1959 hasta mayo de 1963, con una duración total de 50 meses. Los datos anteriores sugieren una ligera tendencia hacia una mayor frecuencia de los eventos cálidos y una mayor persistencia de los eventos fríos. Los resultados del análisis de los periodos a analizar se muestran de la Figura 13 a la Figura 15, cuya información se resume en la Tabla 2 y se detalla de la Tabla 13 a la Tabla 16 del Anexo.



Figura 13. Duración de los eventos de El Niño.

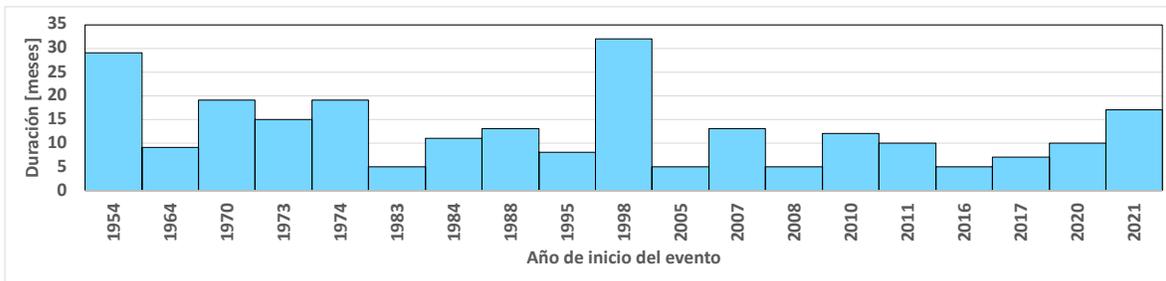


Figura 14. Duración de los eventos de La Niña.

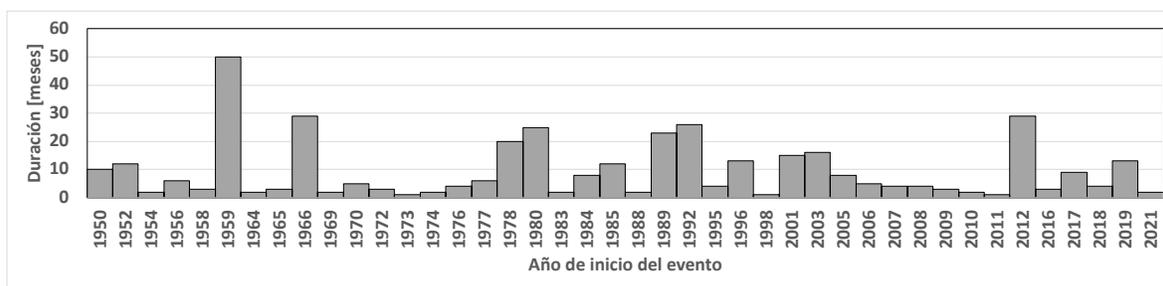


Figura 15. Duración de los eventos neutros.

Tabla 2. Cantidad y duración de los eventos del ENSO por fase.

Fase	Eventos	Duración media [meses]	CV [%]	Duración máxima [meses]
El Niño	23	10.043	41.57	19
La Niña	19	12.842	58.28	32
Neutra	42	9.381	109.27	50

Los resultados obtenidos, a pesar de ser consistentes con los presentados en la bibliografía, tienen una utilidad limitada para este estudio cuando se considera su representatividad sobre la muestra analizada, pues, como se aprecia en la Tabla 2, el coeficiente de variación de la duración media supera el 40% para todas las fases, lo que indica una elevada dispersión de los datos en relación con sus medias. Ante esta situación, se propuso un segundo análisis con un enfoque diferente, buscando definir periodos representativos de fácil interpretación y comparabilidad; considerando la relevancia de las fases cálidas y frías sobre las neutras, centrándose en las primeras; y recurriendo a eventos naturales periódicos bien definidos y estudiados como lo son las estaciones astronómicas (primavera, verano, otoño e invierno), las cuales se establecen en torno a los solsticios y equinoccios, y no dependen de características particulares que pueden variar de sitio en sitio, como ocurre con las estaciones climáticas. En este análisis, se identificó la cantidad de estaciones astronómicas que fueron abarcadas completamente por una sola de las fases del ENSO, así como su intensidad promedio del ONI. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Análisis del ENSO por estaciones astronómicas.

Fase	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
	Eventos	ONI medio	Eventos	ONI medio	Eventos	ONI medio	Eventos	ONI medio
El Niño	7	0.91	12	1.15	21	1.25	14	1.30
La Niña	10	-0.84	13	-0.89	20	-1.12	19	-1.08

En el caso de La Niña, el otoño no solo destacó por ofrecer el mayor número de casos de estudio, sino también por ser la estación de mayor intensidad. En cambio, para El Niño fue necesario ponderar la relevancia del otoño, que concentró una mayor cantidad de eventos; con la del invierno, que presentó una mayor intensidad y caracterización del fenómeno, aunque solo un 3.85% por delante del otoño. Tomando en cuenta la importancia de comparar las condiciones de una fase con las de la otra y evitar variaciones en los datos debidas al cambio de las condiciones particulares de cada estación, los periodos de estudio fueron definidos como todos aquellos otoños que hayan sido abarcados de inicio a fin por cualquiera de las fases del ENSO. Estos se muestran de la Tabla 4 a la Tabla 7.

Tabla 4. Periodos de análisis para la fase de El Niño.

Periodo	Estación	Año
1	Otoño	1951
2	Otoño	1953
3	Otoño	1957
4	Otoño	1963
5	Otoño	1965
6	Otoño	1969
7	Otoño	1972
8	Otoño	1976
9	Otoño	1977
10	Otoño	1982
11	Otoño	1986

Tabla 5. Periodos de análisis para la fase de El Niño (continuación).

Periodo	Estación	Año
12	Otoño	1987
13	Otoño	1991
14	Otoño	1994
15	Otoño	1997
16	Otoño	2002
17	Otoño	2004
18	Otoño	2006
19	Otoño	2009
20	Otoño	2015
21	Otoño	2018

Tabla 6. Periodos de análisis para la fase de La Niña.

Periodo	Estación	Año
1	Otoño	1954
2	Otoño	1955
3	Otoño	1964
4	Otoño	1970
5	Otoño	1971
6	Otoño	1973
7	Otoño	1975
8	Otoño	1983
9	Otoño	1988
10	Otoño	1995
11	Otoño	1998
12	Otoño	1999
13	Otoño	2000
14	Otoño	2007
15	Otoño	2010
16	Otoño	2011
17	Otoño	2016
18	Otoño	2020
19	Otoño	2021
20	Otoño	2022

Tabla 7. Periodos de análisis para la fase neutra.

Periodo	Estación	Año
1	Otoño	1950
2	Otoño	1952
3	Otoño	1959
4	Otoño	1960
5	Otoño	1961
6	Otoño	1962
7	Otoño	1966
8	Otoño	1967
9	Otoño	1978
10	Otoño	1980
11	Otoño	1981
12	Otoño	1985
13	Otoño	1989
14	Otoño	1990
15	Otoño	1992
16	Otoño	1993
17	Otoño	1996
18	Otoño	2001
19	Otoño	2003
20	Otoño	2012
21	Otoño	2013
22	Otoño	2019

Respecto a la malla espacial delimitada, se compuso por 1,569 coordenadas, como se muestra en la Figura 16.

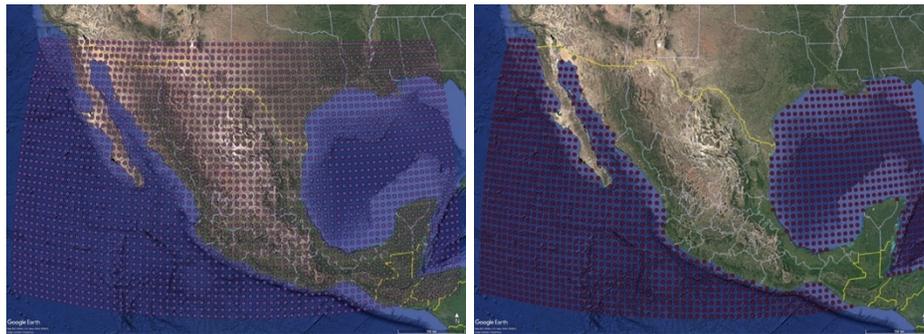


Figura 16. Malla espacial completa (izquierda) y delimitada (derecha).

V.2. Estadísticos representativos

El coeficiente de variación del promedio, para 6 eventos, se presentan en la Figura 17. En el caso de la potencia del viento, el coeficiente de variación alcanzó valores máximos de hasta 600% en la ecorregión de Transición Mexicano del Pacífico (Figura 17b), donde se identificó una zona con una variación significativamente alta y persistente en cada fase del ENSO. De manera similar, la potencia del oleaje mostró coeficientes de variación con picos de hasta 450% (Figura 17f), observándose un patrón en las ecorregiones del Sur del Golfo de México y el Golfo de California. Los elevados niveles de variación indicaron una significativa dispersión de los registros de las de potencias respecto a su promedio, lo que evidenció que la media no era un parámetro representativo en este contexto y fue descartada del análisis.

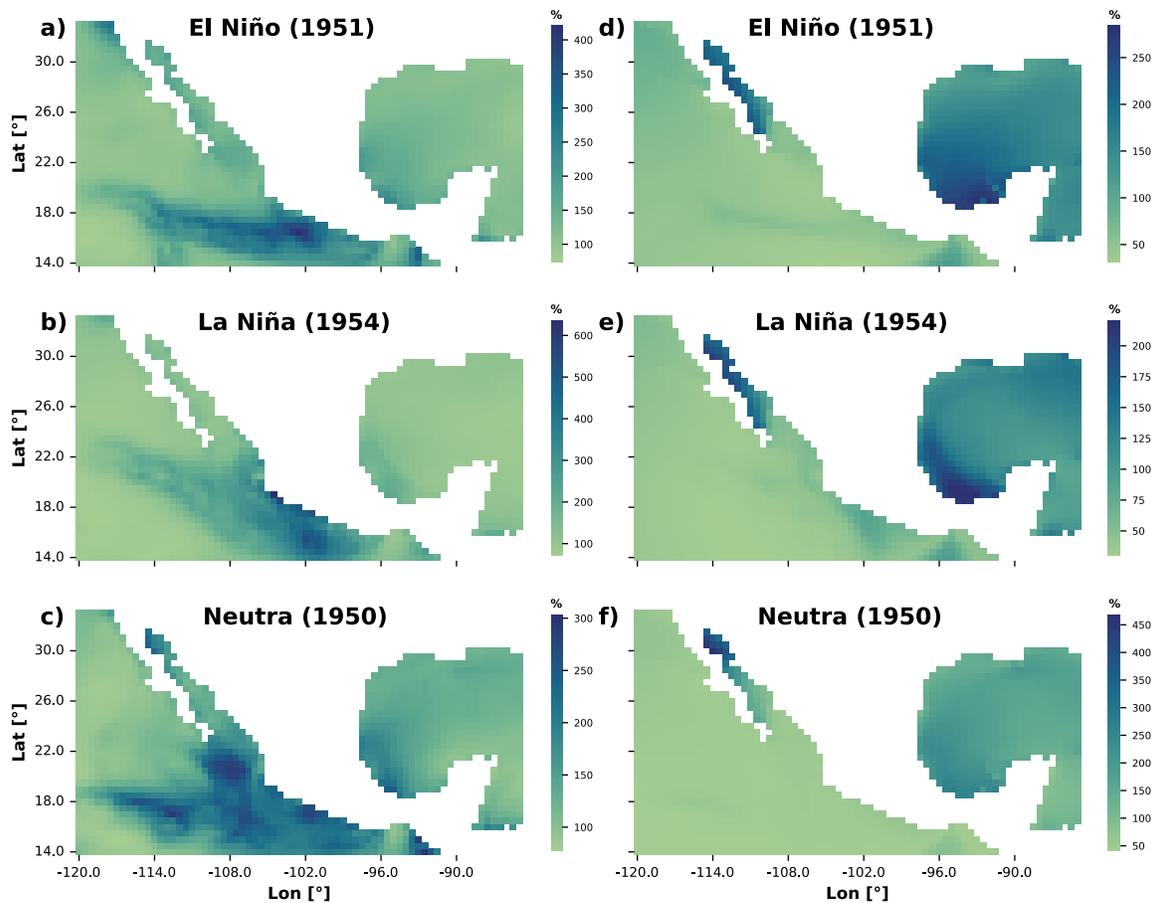


Figura 17. Coeficiente de variación para la potencia de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f).

El cálculo del resto de estadísticos representativos arrojó 63 archivos, uno para cada otoño analizado, con los valores mínimos, máximos y la mediana de la potencia de viento y oleaje para cada una de las 1,569 coordenadas; se muestra un ejemplo en la Tabla 8. Estos resultados

fueron utilizados para el cálculo de las tendencias de variación de cada estadístico seleccionado.

Tabla 8. Extracto de los estadísticos para otoño de El Niño de 1951.

Lat [°]	Lon [°]	P _{WaveMin} [kW/m]	P _{WaveMed} [kW/m]	P _{WaveMax} [kW/m]	P _{WindMin} [kW/m ²]	P _{WindMed} [kW/m ²]	P _{WindMax} [kW/m ²]
14	-120.0	6.9976	24.3308	97.3517	0	0.1380	1.1264
14	-119.5	6.7696	24.2863	97.4522	0	0.1326	1.1217
14	-119.0	6.5824	24.2084	97.2873	0	0.1280	1.1450
14	-118.5	6.3531	24.3382	95.8940	0	0.1224	1.1414
...

V.3. Tendencias de variación de las potencias de viento y oleaje

La Figura 18 ilustra el comportamiento temporal de la mediana de la potencia de oleaje para la coordenada (18°, -105°), donde cada punto del gráfico representa un periodo de análisis correspondiente a la fase de El Niño. En este caso, el valor de la pendiente calculada fue de 68.418 W/m/Año, lo cual indicó que, en dicho sitio, la mediana de la potencia de oleaje ha experimentado un incremento de 68.418 watts por metro en cada año del periodo estudiado. Cabe destacar que en la mayoría de los casos la magnitud de la pendiente fue extremadamente pequeña lo que dificultaba su interpretación, por este motivo se hizo una conversión de unidades de kilowatts a watts.

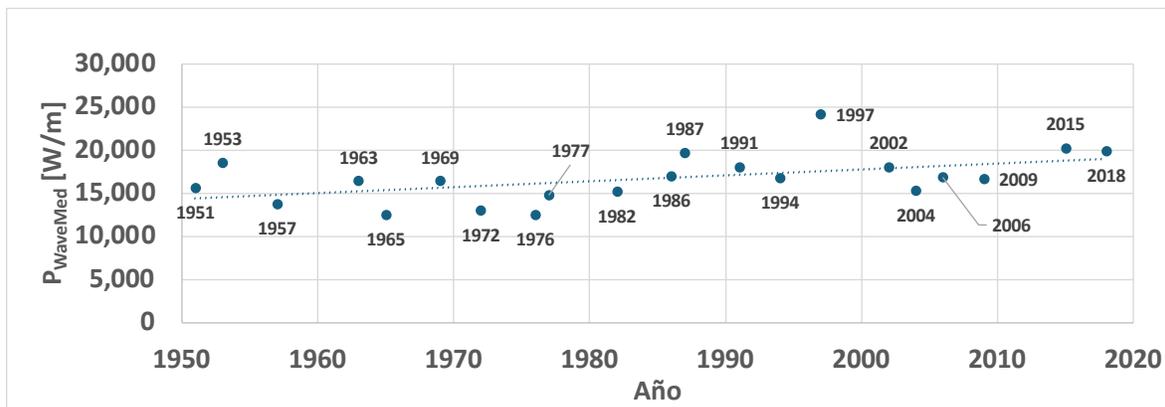


Figura 18. Ajuste lineal de la mediana de la potencia de oleaje durante la fase de El Niño para la coordenada (18°, -105°).

A continuación, se presentan los gráficos de variación de las potencias de oleaje y viento elaborados a partir de las mallas con las tasas de crecimiento, uno por cada fase del ENSO. Los datos se representaron mediante mapas de calor, utilizando un gradiente de color donde el azul indica una menor variación, el rojo una mayor y el gris señala una variación nula. Cada gráfico se compone de seis paneles organizados en dos columnas y tres filas. Las columnas corresponden a las potencias analizadas (la primera para el viento y la segunda para el oleaje), mientras que las filas agrupan la variación por estadísticos (la primera para los valores mínimos, la segunda para la mediana y la tercera para los valores máximos).

La Figura 19, correspondiente a la fase de El Niño, denota que los valores mínimos de la potencia de viento (Figura 19a) apenas han experimentado cambios durante el periodo de estudio. Una pequeña región hacia el poniente del Océano Pacífico, fuera de la ZEE de México, experimentó una combinación de disminución y aumento de la pendiente de la línea de tendencia, pero en ningún caso fue inferior o superior a un watt por metro cuadrado para cada año transcurrido, en cambio, en las variaciones de los valores mínimos de la potencia de oleaje (Figura 19d) destacaron dos zonas importantes, una de decremento, en el Pacífico Sudcaliforniano y parte de la Transición Mexicano del Pacífico, donde la disminución por año alcanzó hasta 30 W/m; y otra de incremento, en el límite inferior de la región de estudio, comenzando desde el Pacífico Centroamericano y avanzando hacia el Pacífico Occidental, donde se presentó un incremento de hasta 10 W/m/año. Entre la Figura 19a y Figura 19d no se identificó algún patrón espacial.

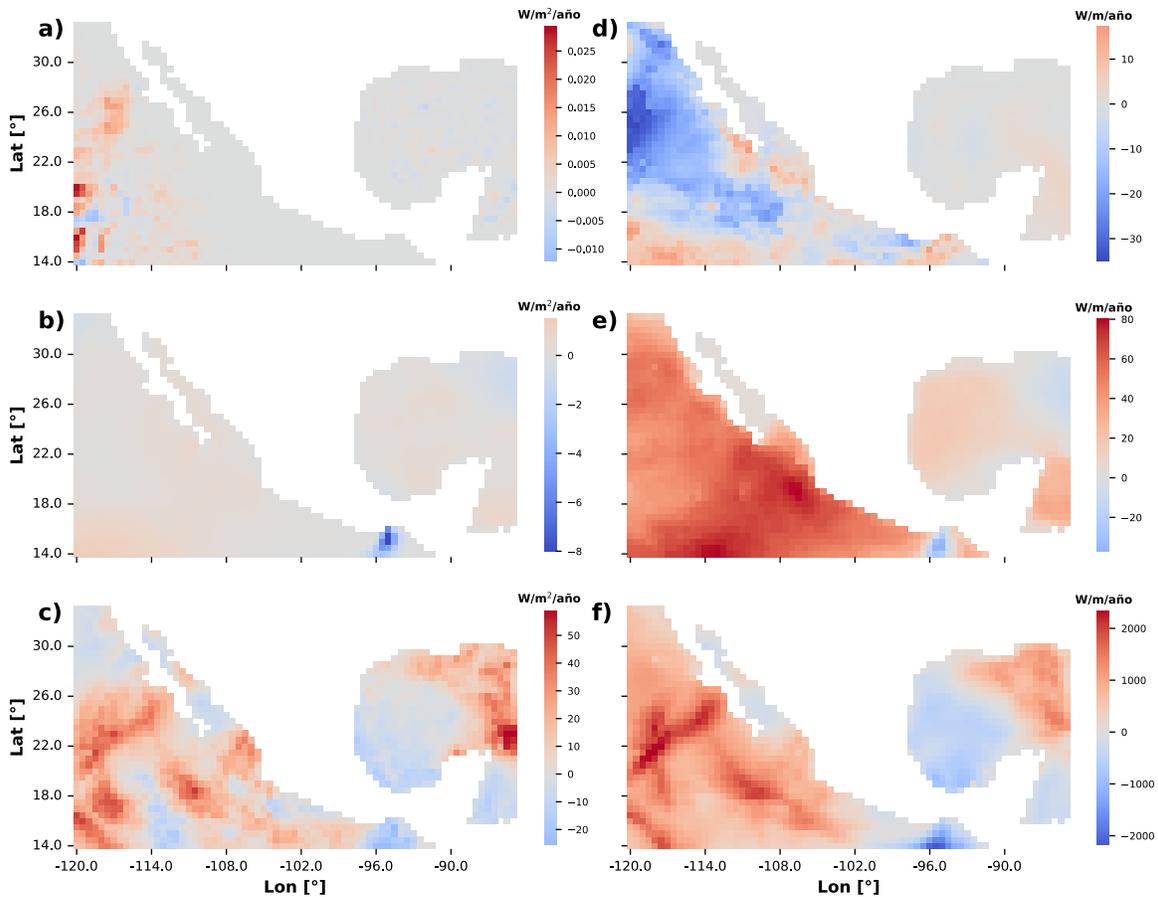


Figura 19. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante El Niño. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).

Para las variaciones de las medianas se encontraron sitios con características similares en ambas potencias. Dos pequeñas regiones, una al sur del Istmo de Tehuantepec y otra al noreste del Golfo de México cerca de Florida, destacaron por una tendencia de la reducción de ambas potencias, de hasta $8 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento (Figura 19b), y hasta 20 W/m/año para el oleaje (Figura 19e). El resto de la zona de estudio se mantuvo principalmente con baja variación para la potencia de viento, pero notoriamente en ascenso para la variación de la potencia de oleaje, particularmente al noroeste de la ecorregión Transición Mexicano del Pacífico donde cada año aumentaron hasta 80 W/m .

La Figura 19c y Figura 19f, correspondientes a la variación de los datos máximos, presentaron una configuración espacial muy similar. De abatimiento en el Golfo de México, Mar Caribe, Pacífico Centroamericano y parte del Golfo de California; y de crecimiento en el resto de la región. La disminución por año llegó hasta los 20 W/m^2 para la potencia de viento, y $2,000 \text{ W/m}$ para la de oleaje al sur del Istmo de Tehuantepec; mientras el aumento

de estas fue respectivamente, 50 W/m^2 en el Mar Caribe, y $2,000 \text{ W/m}$ al suroeste del Pacífico Sudcaliforniano.

En la Figura 20, correspondiente a la fase de La Niña, se identificó un comportamiento similar al registrado durante El Niño para las variaciones de los datos mínimos de la potencia de viento (Figura 20a). La región del Pacífico, al oeste de la zona de estudio, presentó una mezcla de disminución y aumento, donde destacó la segunda. A su vez, se identificó una nueva región de ascenso en el Mar Caribe, pero en ninguna de estas se superó el umbral descrito en su caso homólogo. En cambio, las variaciones de los datos mínimos de la potencia de oleaje (Figura 20d) segmentaron la región en dos zonas bien definidas, una de decremento en el Océano Pacífico, donde se alcanzó una tasa de contracción anual de hasta 50 W/m en el Pacífico Sudcaliforniano; y otra de variaciones cercanas a cero en el Golfo de California, Golfo de México y Mar Caribe.

Se identificó una paridad espacial en las variaciones de las medianas de la potencia del viento y oleaje (Figura 20b y Figura 20e). En ambos casos, la región costera del norte de México mostró una tendencia de baja variación (propensa al abatimiento), mientras que al sur del Istmo de Tehuantepec se observaron disminuciones mayores en las potencias, de hasta $1.25 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y $30 \text{ W/m}/\text{año}$ para el oleaje. El resto de la región de estudio presentó tendencias de incremento, de hasta $0.75 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y alcanzando hasta $50 \text{ W/m}/\text{año}$ para el oleaje.

Por otro lado, los valores máximos de la potencia del viento (Figura 20c) demostraron un aumento de hasta 30 W/m^2 en el norte del Golfo de México y en el sur del Pacífico. En contraste, se registraron disminuciones de hasta $30 \text{ W/m}^2/\text{año}$ en la ecorregión Transición Mexicana del Pacífico, el Istmo de Tehuantepec, el sur del Golfo de México y el Mar Caribe. En cuanto a la potencia del oleaje (Figura 20f), esta mostró un comportamiento similar, pero con una clara tendencia a la intensificación, cubriendo prácticamente todo el Océano Pacífico, salvo el sureste de la ecorregión de la Transición Mexicana del Pacífico y el Istmo de Tehuantepec. Los incrementos superaron los $1,000 \text{ W/m}/\text{año}$, mientras que los decrementos alcanzaron los $1,500 \text{ W/m}/\text{año}$.

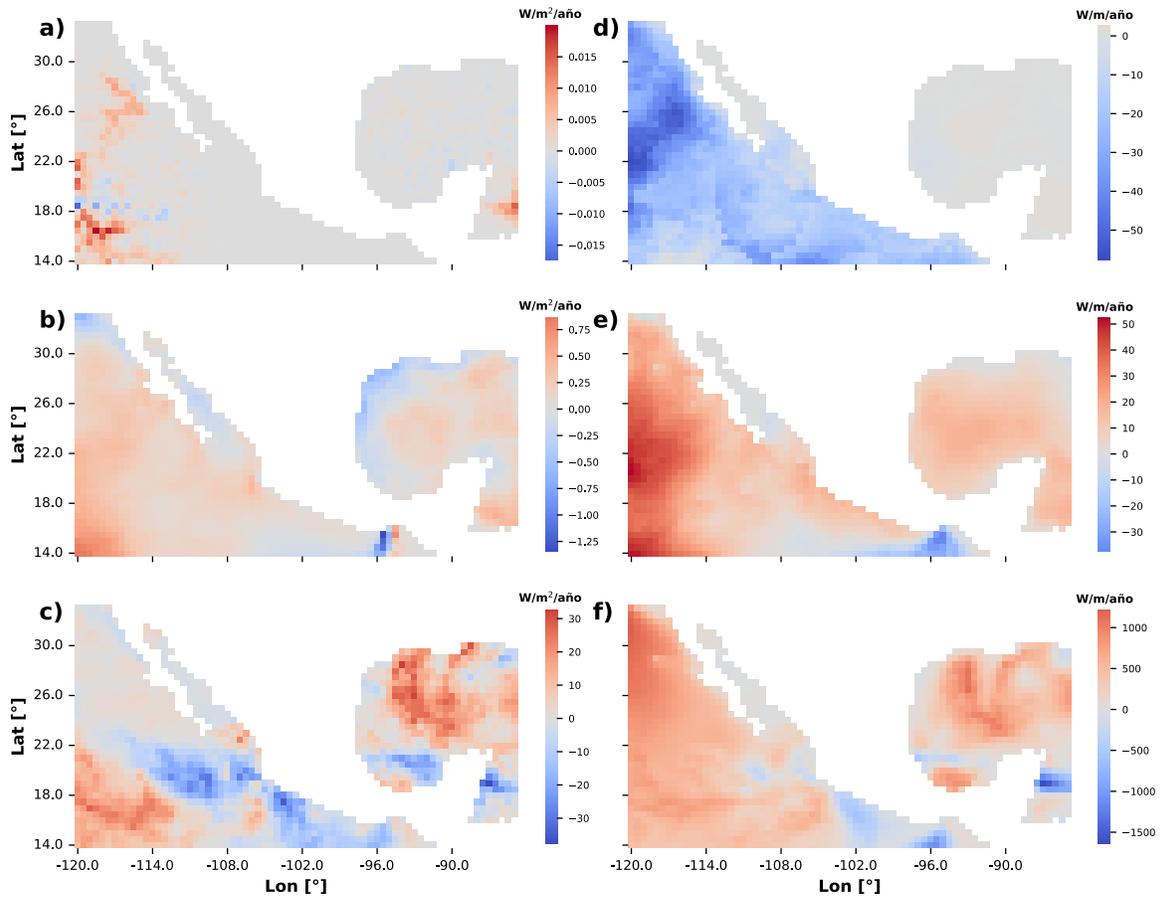


Figura 20. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante La Niña. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).

Para la fase neutra (Figura 21), la región completa presentó variaciones de los datos mínimos de la potencia de viento (Figura 21a) que de forma generalizada no alcanzaron los ± 0.02 $W/m^2/año$. En contraste, los mínimos de la potencia de oleaje (Figura 21d) variaron significativamente, no solo en cuanto a magnitud, sino también respecto a su distribución espacial. Mientras el Golfo de California, Golfo de México y el Mar Caribe permanecieron mayormente neutros, el Océano Pacífico presentó zonas combinadas de incremento y decremento, alcanzando tasas positivas de 20 $W/m/año$ y negativas de 30 $W/m/año$.

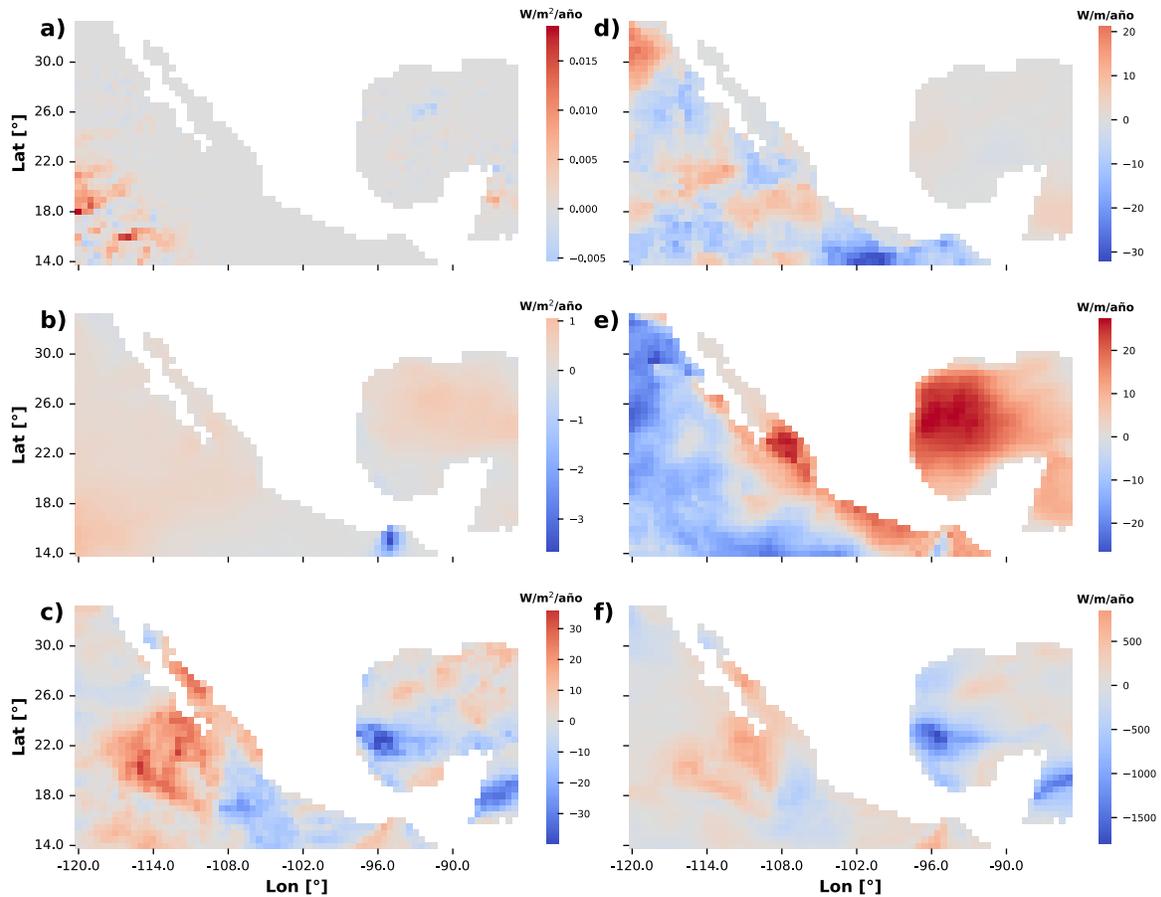


Figura 21. Variación de las potencias de viento (a, b y c) y de oleaje (d, e y f) durante la fase neutra. Datos mínimos (a y d), mediana (b y e) y datos máximos (c y f).

En cuanto a la variación de las medianas de los datos de viento (Figura 21b), solo el sur del Istmo de Tehuantepec mostró una tendencia de reducción, la cual llegó a los $3 \text{ W/m}^2/\text{año}$, mientras el resto de la región presentó un aumento de $1 \text{ W/m}^2/\text{año}$ denotando en conjunto condiciones de baja variabilidad temporal. Por su parte, la variación de las medianas de la potencia de oleaje (Figura 21e) aumento notablemente al sur del Golfo de California y en el Golfo de México, superando los 20 W/m/año , mientras hubo abatimientos de hasta 20 W/m/año en el Océano Pacífico.

Finalmente, la variación de los datos máximos presentó un patrón similar para ambas potencias (Figura 21c y Figura 21f). Se observaron incrementos al sur del Pacífico Sudcaliforniano y al norte de la Transición Mexicana del Pacífico, con tasas de hasta $30 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y 500 W/m/año para el oleaje. Por el contrario, hubo disminuciones en el sur del Golfo de México y el sur de la Transición Mexicana del Pacífico, de hasta $30 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y $1,500 \text{ W/m/año}$ para el oleaje.

Los resultados descritos señalan que la energía disponible en las ráfagas de viento ha experimentado tendencias de variación poco marcadas, principalmente para el registro de datos mínimos y las medianas. En contraste, la energía en las olas ha pasado por cambios notables, particularmente durante los eventos de mayor intensidad. A pesar de la estrecha relación entre los fenómenos asociados al viento y oleaje, los patrones espaciales observados entre la variación de ambas potencias en las distintas fases y estadísticos no fueron consistentes, al grado de dificultar la derivación de conclusiones precisas sobre los comportamientos observados, presumiblemente debido a que el oleaje tiene una dependencia sobre el viento distante.

En términos generales, las variaciones de las potencias se mantuvieron dentro de los rangos descritos en la Tabla 9. Para la potencia de viento, el rango de variación más bajo correspondió a los datos mínimos, que en ningún caso presentaron incrementos o decrementos superiores a $1 \text{ W/m}^2/\text{año}$. Les siguieron las medianas, donde las disminuciones llegaron a ser ocho veces más pronunciadas que los incrementos. Por último, los datos máximos mostraron la mayor variación, con incrementos que superaron los decrementos en un 66.66%.

Estadístico	Límites de la variación de P_{Wind} [$\text{W/m}^2/\text{año}$]		Límites de la variación de P_{Wave} [W/m/año]	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Mínimos	-1.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}	-50	20
Mediana	-8	1	-30	80
Máximos	-30	50	-2,000	2,000

Tabla 9. Rangos de variación por estadístico para las potencias de viento y de oleaje.

En cuanto a la potencia de oleaje, el orden de los estadísticos respecto a la magnitud de sus rangos de variación fue el mismo que para el viento, pero la diferencia entre las variaciones de los datos mínimos y las medianas no fue tan marcada como en el caso de las potencias de viento, de hecho, los datos mínimos llegaron a mostrar decrementos mayores a los de las medianas. La diferencia real se presentó respecto a los datos máximos, los cuales llegaron a magnitudes del orden de millares.

La escasa variación observada en los datos mínimos se explica principalmente porque, en series de tiempo extensas, el valor mínimo del registro de viento suele ser 0 m/s , lo que a su

vez refleja una potencia nula. En consecuencia, cuando se calcula la pendiente de la línea de tendencia de un registro de ceros, la pendiente también es cero. En otros casos, aunque algunos los valores de la potencia de viento sean distintos de cero, si estos aún predominan o las magnitudes de los datos son muy similares entre sí, la pendiente calculada será igualmente cercana a cero. En el resto de los estadísticos, las variaciones cercanas a cero se presentaron principalmente porque las magnitudes de dichos estadísticos en el registro temporal fueron muy similares entre sí.

V.4. Clústeres de variación de las potencias de viento y oleaje

En la Figura 22 se ejemplifica el cálculo del coeficiente de silueta para las medianas de El Niño en un rango de uno a diez clústeres, donde se puede observar que el número óptimo de grupos fue dos y el menos favorable seis, sin seguir una tendencia particular.

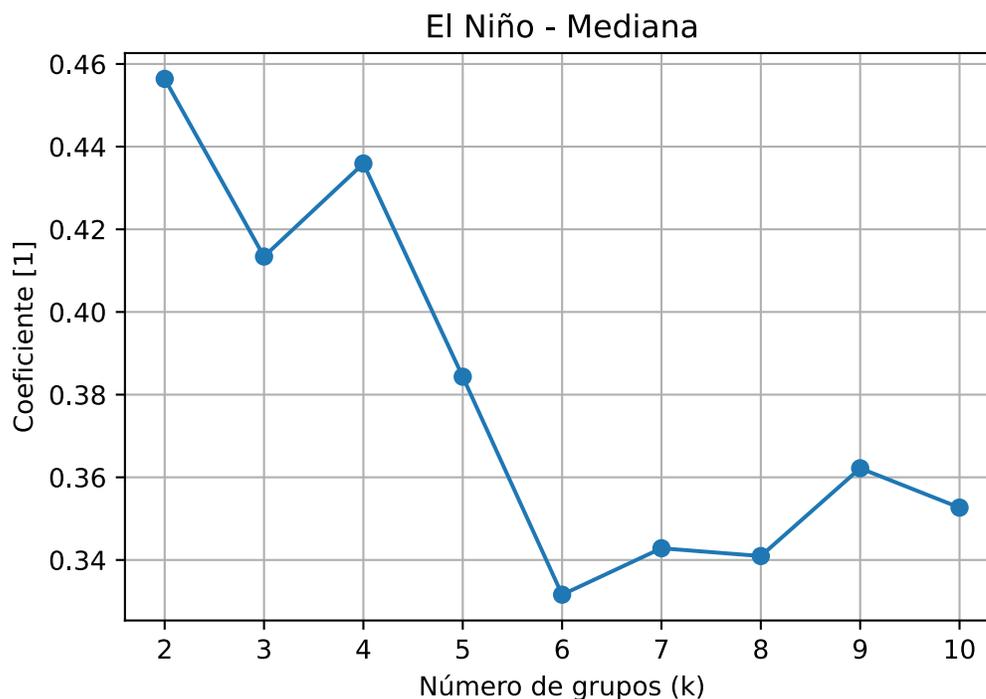


Figura 22. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y oleaje durante la fase de El Niño.

A continuación, se muestra una tabla con el resumen del número de clústeres calculado para cada caso de estudio. El resto de los gráficos para el análisis del coeficiente de silueta se presenta de la Figura 26 a la Figura 33 del Anexo.

Tabla 10. Número de clústeres por caso de análisis.

Estadístico	Número de clústeres		
	El Niño	La Niña	Neutra
Mínimos	2	5	7
Mediana	2	6	2
Máximos	5	4	5

Con los resultados generados en los análisis de clustering se construyeron mapas con la delimitación espacial de los grupos identificados para la variación de los estadísticos asociados a cada fase; y tablas con las características de los centroides para cada grupo de clústeres. Estas últimas se presentan de la Tabla 17 a la Tabla 25 del Anexo. Es importante destacar que los términos "alta", "baja" o "nula" variabilidad son relativos y se refieren específicamente al rango de valores obtenido para el mismo parámetro y estadístico, en cualquiera de las fases analizadas del ENSO (Tabla 9).

El clustering para la fase de El Niño (Figura 23) identificó para la variación de los datos mínimos (Figura 23a), dos grupos representativos. El primero, abarcando ambos golfos, el Mar Caribe y todo el sur de la región de estudio, con una tendencia general de incremento para la potencia de oleaje (0.59 W/m/año) y viento ($2.38 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2/\text{año}$). El segundo clúster cubrió el Pacífico Sudcaliforniano y oeste de la Transición Mexicano del Pacífico, con una tendencia negativa para el oleaje (-15.26 W/m/año) y positiva para el viento ($2.58 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{año}$). El patrón espacial de los clústeres siguió el observado para la variación de la potencia de oleaje (Figura 19d) con la diferencia de no hacer distinción entre la región incremento en el Pacífico y la zona de variación cercana a cero en el Golfo de México. También, los centroides de los grupos indicaron condiciones positivas con escasa o muy poca variación, excepto en el caso del oleaje del segundo grupo, que mostró una variación negativa de magnitud media.

Las variaciones de las medianas (Figura 23b) se dividieron en dos clústeres, el primero, cubriendo ambos golfos, el Mar Caribe y el Pacífico Centroamericano, con una media de variación de 9.09 W/m/año para el oleaje y $2.85 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento. El segundo abarcó el resto del Océano Pacífico con condiciones de variación media de 53.79 W/m/año para el oleaje y $3.09 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento. La distribución de estos grupos se aproximó de forma acertada al patrón descrito para la Figura 19b y Figura 19e, el cual mantiene cierta similitud al de los clústeres para datos mínimos. Los centroides del primer clúster mostraron una variación positiva pero baja tanto para los datos de viento como para los de oleaje. En el segundo clúster, la variación fue positiva, con una magnitud media para el viento y alta para el oleaje.

Por su parte, las variaciones de los datos máximos (Figura 23c) formaron cinco clústeres de características diversas. El primero cubrió el sureste del Golfo de México, Mar Caribe y Pacífico Centroamericano, mostrando una tendencia negativa y baja de -383.69 W/m/año para el oleaje y $-5 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento. El segundo grupo abarcó la mayor parte de la Transición Mexicano del Pacífico y la zona al suroeste de esta, con una tendencia de variación positiva para ambas potencias, muy baja para el viento y media-baja para el oleaje (671.76

W/m/año). El tercer clúster compartió las tendencias de variación del segundo, con una magnitud media-baja para ambas potencias, este se posicionó al noreste del Golfo de México. El cuarto, en el Golfo de California y al oeste de la Península de Baja California, presentó una variación prácticamente nula en la potencia del viento y media-baja para el oleaje (532.23 W/m/año). El quinto clúster, situado entre el segundo y el cuarto, mostró una variación media-alta para el viento (27.28 W/m²/año) y alta para el oleaje (1,420.56 W/m/año). Para este estadístico la distribución espacial siguió el patrón observado en la potencia de viento.

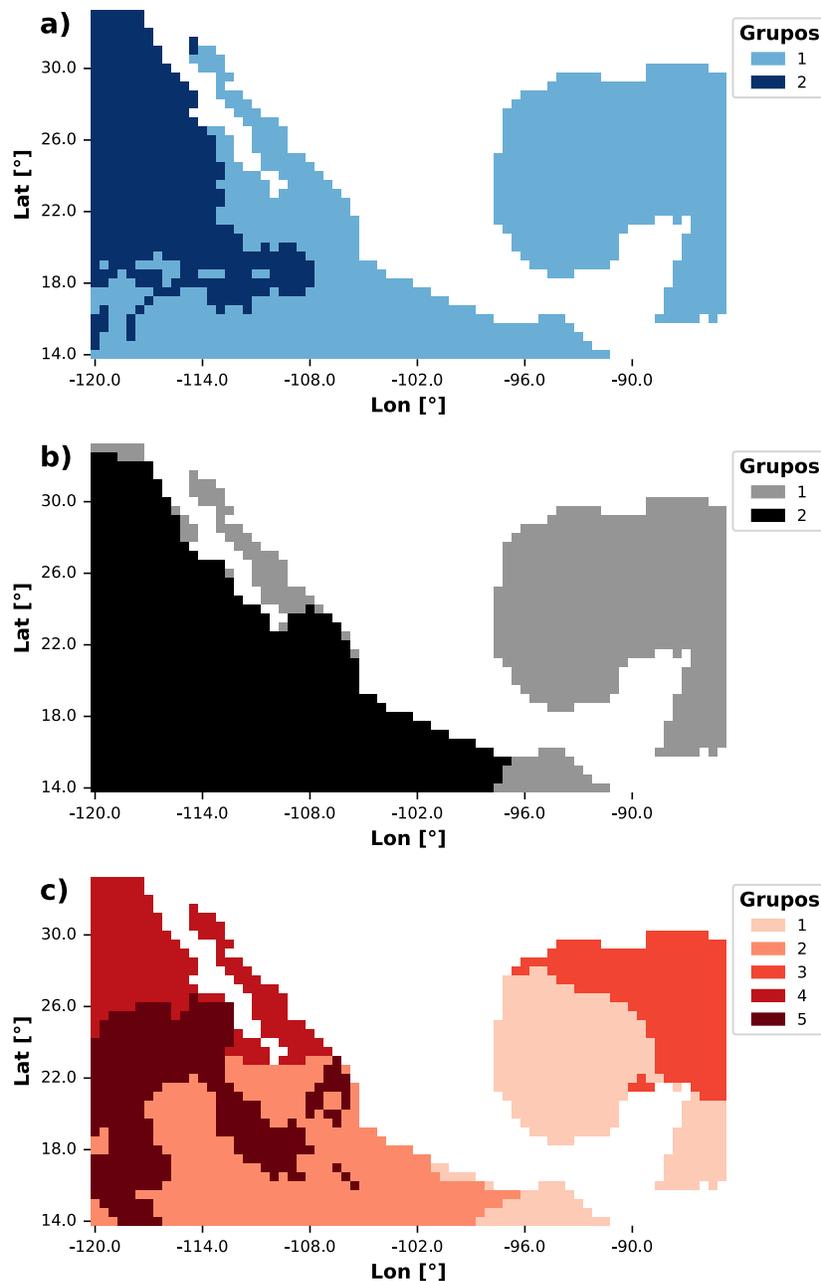


Figura 23. Clústeres por estadístico para El Niño. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.

De forma general, las agrupaciones hechas para los datos mínimos y las medianas mostraron una heterogeneidad considerable en el Pacífico, donde se identificaron tanto incrementos como decrementos en distintas regiones, lo que sugiere una complejidad mayor en comparación con el comportamiento más uniforme en el Golfo de México, Mar Caribe y Pacífico Centroamericano, donde predominaron los incrementos suaves. Para el caso de los datos máximos, este patrón se invirtió, el sur del Golfo de México y sus regiones aledañas fueron catalogadas como sitios de disminución para las potencias analizadas, mientras el resto de la zona de estudio fue principalmente propensa al incremento de estas. Para esta fase, las costas más afectadas fueron desde Sinaloa a Guerrero, principalmente ciertas zonas de Sinaloa, donde el incremento de la potencia de oleaje alcanzó 71% de la magnitud máxima de variación registrada en todas las fases.

A diferencia de El Niño, La Niña (Figura 24) demostró ser una fase bastante más heterogénea entre sus diferentes estadísticos, los clústeres formados no mostraron relaciones significativas respecto a su distribución espacial, tendencias y magnitud de sus variaciones. El análisis de los datos mínimos (Figura 24a) identificó cinco clústeres, el primero, ubicado en el Golfo de California, Golfo de México y Mar Caribe, con una variación cercana a cero para ambas potencias. El segundo, caracterizado por decrementos muy pequeños para el viento (-4.94×10^{-3} W/m²/año) y medios para el oleaje (-25.12 W/m/año). Además, a diferencia de los grupos descritos hasta este punto, este fue el de menor extensión, de apenas unas cuantas celdas al suroeste del Océano Pacífico. Por el contrario, el tercer clúster cubrió la mayor parte de la región sureste del Pacífico, desde la punta de la península de Baja California hasta el límite inferior de la zona de estudio. Este grupo se caracterizó por pequeños incrementos de la potencia de viento (3.19×10^{-4} W/m²/año) y decrementos medios-bajos para el oleaje (-18.37 W/m/año). El cuarto grupo, mantuvo las tendencias del tercero, pero aumentó sus magnitudes, principalmente para la potencia de oleaje, la cual alcanzó una variación anual de -34.02 W/m/año. Por su parte, el quinto grupo aumentó la variación de la potencia de viento hasta los 8.67×10^{-3} W/m²/año y redujo la del oleaje hasta los -24.89 W/m/año, destacando por su escasa extensión, muy similar a la observada en el segundo clúster, tanto en dimensión como ubicación.

En el caso de las variaciones de datos máximos (Figura 24c), se identificaron cuatro grupos, siendo la menor cantidad de clústeres entre los tres estadísticos analizados en la fase. La distribución de los grupos fue relativamente diferente a los casos ya descritos. En la Figura 24c, se observa que el primer grupo abarcó la región costera sur de México, excluyendo una pequeña área cercana a Coatzacoalcos. Este fue el único grupo que presentó decrementos, los cuales fueron de pequeña magnitud en comparación con otras fases: -9.60 W/m²/año para

la potencia de viento y -19.47 W/m/año para el oleaje. El segundo grupo, localizado en la esquina suroeste de la región de estudio, mostró incrementos ligeros en la potencia de viento ($10.48 \text{ W/m}^2/\text{año}$) y medios-bajos para el oleaje (520.10 W/m/año). El tercer grupo cubrió el resto del Océano Pacífico, con variaciones casi nulas en la potencia de viento y tendencias similares en magnitud a las del grupo anterior. Finalmente, el cuarto grupo, que abarcó el norte del Golfo de México desde la península de Yucatán, excepto la región de Coatzacoalcos ya mencionada, presentó incrementos similares a los del segundo grupo, pero de menor intensidad: $9.53 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y 431.41 W/m/año para el oleaje.

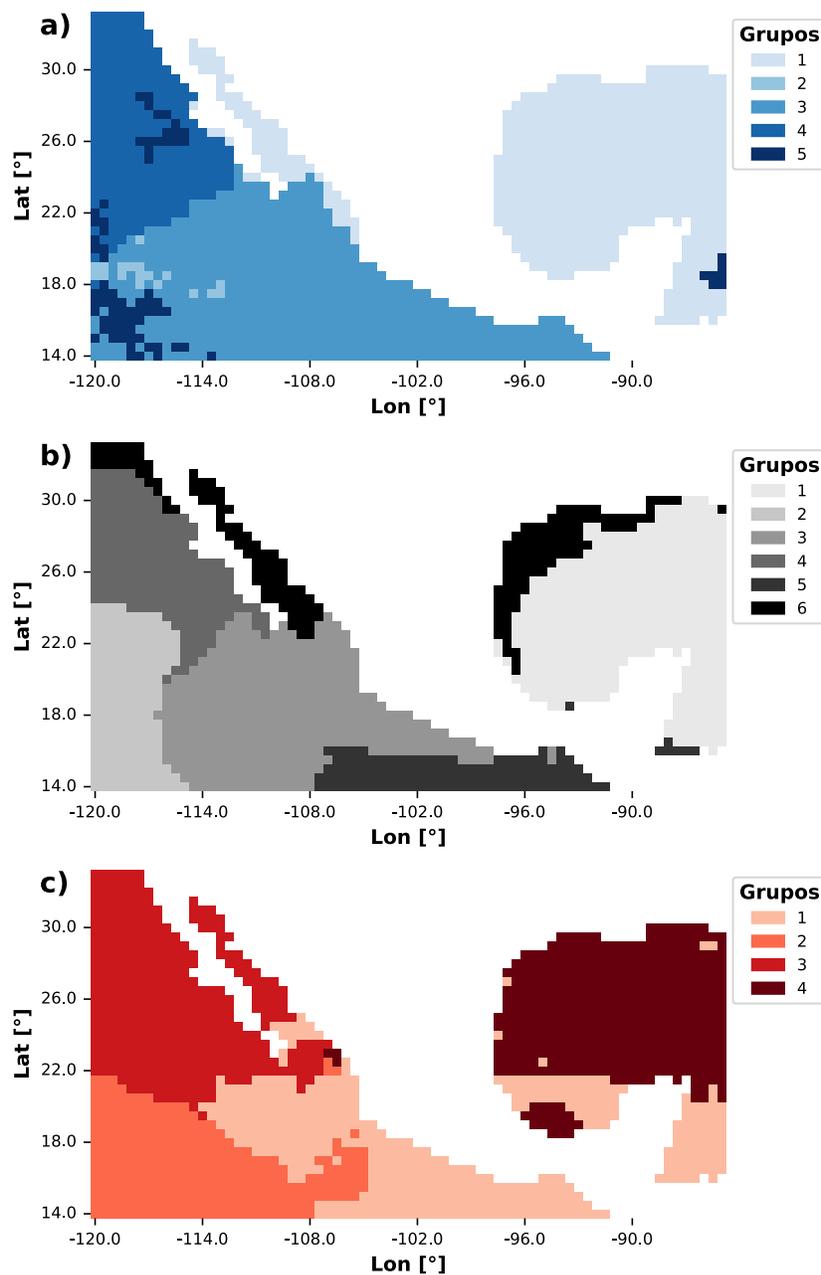


Figura 24. Clústeres por estadístico para La Niña. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.

Los conjuntos de clústeres identificados durante la fase de La Niña siguieron una distribución poco consistente entre sí. Los grupos para los datos mínimos destacaron por presentar en la potencia de oleaje solo decrementos, los cuales fueron principalmente de media magnitud; mientras la potencia de viento permaneció mayormente neutral o con incrementos de magnitud poco significativa. Otro aspecto relevante fue la presencia de grupos con poco dominio espacial, focalizados en la región oeste del Pacífico, mayormente en el sur. Por su parte, los clústeres de medianas y datos máximos coincidieron al identificar al sur de país una región de decrementos, mucho más extensa en la variación de los máximos (Grupo 1) y focalizada para las medianas (Grupo 5); y una segunda de incrementos importantes para los fenómenos de viento, al oeste de la península de Baja California. El resto de la zona de estudio en ambas fases fue muy heterogénea para poder identificar patrones regionales.

Los resultados de la fase neutra (Figura 25) mostraron una agrupación muy detallada para la variación de los datos mínimos (Figura 25a), principalmente en el Océano Pacífico, donde se concentraron seis de los siete grupos formados. El primer grupo se presentó en forma de “manchas” en la región central analizada del Océano Pacífico, una de ellas en las costas de Nayarit, Jalisco y Colima. Este grupo se caracterizó por incrementos, cercanos a cero para la potencia de viento y de media-baja intensidad para la de oleaje (4.56 W/m/año). El segundo grupo se ubicó en la región sur del país en las ecorregiones de Transición Mexicano del Pacífico y Pacífico Centroamericano, solo colindando con una parte de la costa en el Istmo de Tehuantepec. En este se mantuvieron incrementos ligeros en la potencia de viento, pero se produjeron pequeños decrementos para la de oleaje (-16.62 W/m/año). El tercer grupo abarcó una pequeña región al suroeste del Pacífico y dos celdas en el Mar Caribe, en las costas de Quintana Roo, cerca de la frontera con Belice; este se caracterizó por incrementos para la potencia de viento ($7.32 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{año}$) y ligeros decrementos para la de oleaje (-2.18 W/m/año). El cuarto grupo cubrió las regiones dejadas por los tres clústeres anteriores al sur del Pacífico, sin un patrón específico. La tendencia y magnitud de las variaciones fue de $2.83 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y -5.51 W/m/año para el oleaje. El norte del Océano Pacífico fue cubierto por dos clústeres, el quinto en el Golfo de California y al oeste de la península de Baja California, y el sexto en la esquina noroeste de la región de estudio. Estos grupos presentaron tendencias de variación invertidas: de incremento para el viento ($2.14 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2/\text{año}$) y decremento para el oleaje (-2.93 W/m/año) en el Grupo 5, y al revés para el Grupo 6 ($-9.26 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2/\text{año}$ y 12.03 W/m/año , respectivamente). Por otro lado, el séptimo grupo cubrió todo el Golfo de México y Mar Caribe, a excepción de las celdas señaladas del Grupo 3. Este grupo presentó la menor variación para la fase y estadístico, prácticamente nula para ambas potencias.

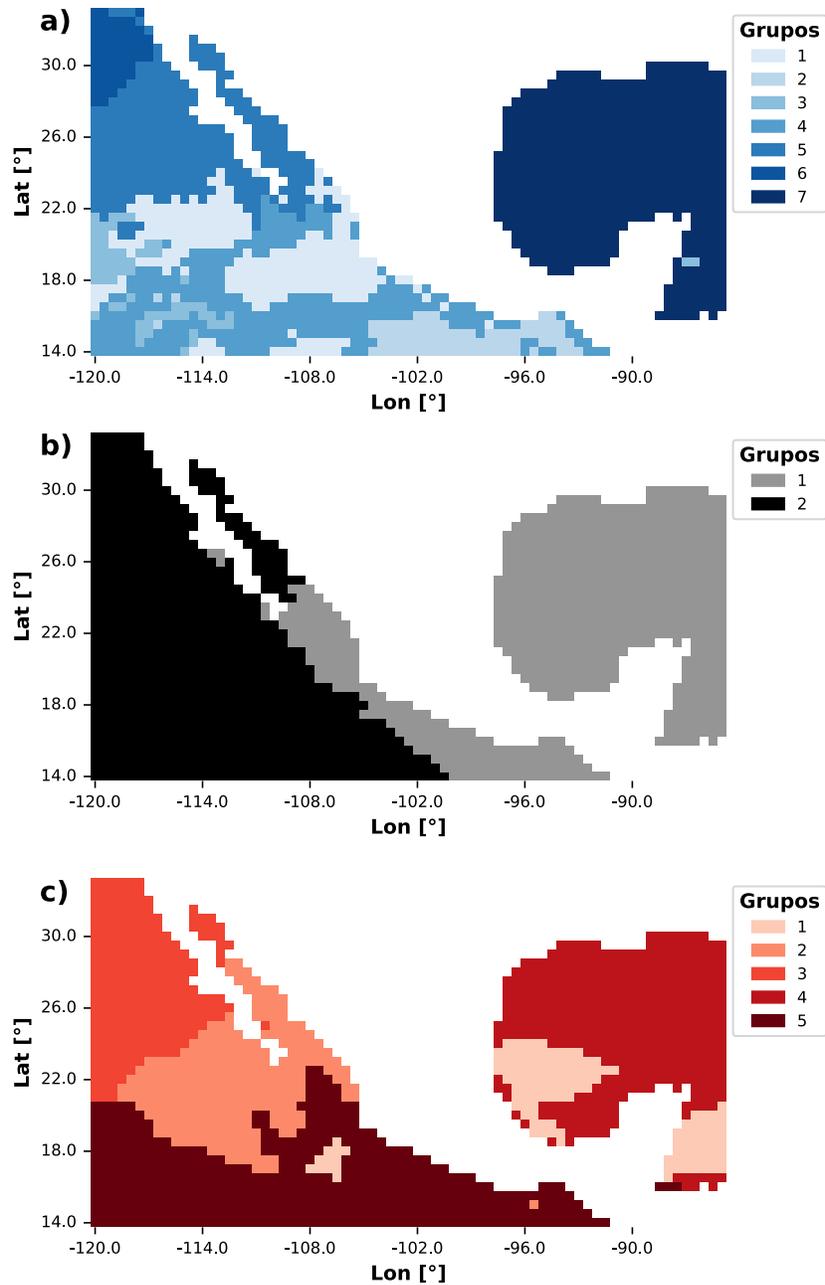


Figura 25. Clústeres por estadístico para la fase neutra. (a) mínimos, (b) mediana y (c) máximos.

Por el contrario, la variación de las medianas (Figura 25b) se dividió en solo dos grupos. El primero abarcando al este, todo el Golfo de México y Mar Caribe, y al oeste las costas desde Sinaloa hasta la frontera con Guatemala; con una incremento bajo para ambas potencias: $1.95 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y 12.93 W/m/año para el oleaje. El segundo grupo, cubrió el resto del Pacífico y Golfo de California, con una media en la tendencia de variación de $2.87 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y -7.69 W/m/año para el oleaje.

Finalmente, la variación de los datos máximos (Figura 25d) se agrupó en cinco clústeres bien definidos y con características distintas. El primero, se formó por tres subregiones, una en el Mar Caribe cerca de la frontera con Belice, otra al suroeste del Golfo de México y la última cerca de las costas de Jalisco y Colima; en estos, se presentaron decrementos en ambas potencias, de $-18.61 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y -770.97 W/m/año para el oleaje, el cual fue el clúster de mayor decremento en todo el análisis. El segundo cubrió el centro y sur del Golfo de California, así como el suroeste de la península de Baja California; las condiciones del clúster reflejaron tendencias de incrementos en la región, de $-16.88 \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y 358.74 W/m/año para el oleaje. El tercer grupo mostró variaciones cercanas a cero para la potencia de viento y de decrementos de media-alta intensidad para la del oleaje (-20.09 W/m/año), esto en el resto del Golfo de California y al noroeste de la península de Baja California. El cuarto grupo cubrió el resto del Golfo de México y Mar Caribe, con decrementos para ambas potencias: $-7.25 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2/\text{año}$ para el viento y -20.09 W/m/año para el oleaje. Por otro lado, el sur del Océano Pacífico mostró muy ligeras tendencias de decremento para los datos de viento ($-8.40 \times 10^{-1} \text{ W/m}^2/\text{año}$), y ligeros aumentos para el oleaje (-11.709 W/m/año).

Tal como lo señalan los resultados, el comportamiento de las variaciones es tan complejo que se vuelve difícil hacer generalizaciones sobre las tendencias y su distribución espacial. Que los comportamientos observados entre estadísticos de una misma fase no sigan patrones similares es una muestra de que cada uno de ellos refleja condiciones distintas y el comportamiento de estas requiere un análisis por separado. Asimismo, siempre se debe tener en cuenta que las variaciones descritas en este capítulo son una tendencia media y general del conjunto de elementos que compone cada clúster, muy diferente a las condiciones puntuales de cada sitio mostradas en la sección anterior.

VI. Conclusiones

Los estadísticos empleados en este estudio fueron obtenidos a partir de series de tiempo de reanálisis de reciente publicación (2020) que proveen de un histórico de más de 80 años que no se encontraba disponible anteriormente, de esta forma, los resultados obtenidos representan una aportación novedosa al análisis de la variabilidad del clima marítimo en México. Las variaciones calculadas demostraron que los estadísticos de las potencias de viento y de oleaje no siguieron patrones espaciales de comportamiento consistentes entre aquellos en una misma fase del ENSO y mucho menos respecto a las otras fases. Sin embargo, al analizar únicamente las variaciones en las medianas (paneles b y e de la Figura 19, Figura 20 y Figura 21), es posible inferir que en las fases de El Niño y La Niña predominó de forma generalizada en la región de estudio, una tendencia de incremento del potencial energético, mientras en la fase neutra se presentaron incrementos en el Golfo de México y costas occidentales del país; y decrementos de los potenciales en el resto del Océano Pacífico.

Asimismo, la magnitud de las variaciones exhibió que los valores máximos fueron mucho más sensibles, mientras que las medianas mostraron una sensibilidad moderada y los valores mínimos una sensibilidad muy baja. Adicionalmente, se identificaron casos donde cerca de variaciones de gran magnitud existían otras con escasa o nula alteración, lo que señaló posible que el estudio requiriera de parámetros adicionales para reflejar mejor el comportamiento del sistema.

En lo que respecta a los clústeres, la heterogénea magnitud y distribución de las variaciones jugó un papel importante a la hora de formar los grupos. A pesar de que los datos fueron estandarizados antes de su análisis, la magnitud de estos fue particularmente relevante, pues, se identificó que el potencial de oleaje, con sus registros de reducida magnitud, representaron una dificultad a la hora de establecer el número óptimo de clústeres; dependiendo de la cantidad de cifras después del punto decimal podía cambiar drásticamente el número de grupos establecido mediante el método de silueta. Como resultado, la cantidad y diversas características de los datos hizo que los centroides se volvieran un elemento muy general para capturar las cualidades particulares de cada clúster, lo que llevó a que “sobre el papel” los grupos parecieran similares entre sí. Esto no significó que los resultados fueran incorrectos, pues, por la propia definición del algoritmo K-means, los elementos en un mismo clúster están estrechamente relacionados entre sí, solo que el centroide es una medida numérica teórica y no un reflejo de todas las condiciones reales que los relacionan. Lo que una vez más sugirió necesario correlacionar los resultados obtenidos con otros similares para encontrar las conexiones que quedaron fuera de este estudio.

En este estudio, la metodología propuesta ayudó a identificar los rasgos más relevantes de estos, entre ellos: su dispersión, su rango de fluctuación y distribución espacial.

VI.1. Futuras líneas de investigación

Considerando las observaciones realizadas, se sugieren las siguientes recomendaciones para orientar futuros trabajos en este tema:

- Medir la variación mediante otros parámetros estadísticos y otras variables climáticas.
- Complementar el cálculo del número óptimo de clústeres utilizando métodos adicionales, como el índice de Davies-Bouldin.
- Explorar algoritmos de clustering que no se basen en distancias euclidianas, de modo que puedan capturar formas no esféricas.
- Simplificar el análisis de clustering realizándolo por fase en lugar de por estadístico, reduciendo así la complejidad de los resultados.
- Replicar la metodología para otras estaciones astronómicas.
- Evaluar las condiciones de oleaje generado por viento distante.

Referencias

- Allison, Edward H., y Hannah R. Bassett. 2015. "Climate change in the oceans: Human impacts and responses". *Science* 350 (6262): 778–82. <https://doi.org/10.1126/science.aac8721>.
- Blanchonnet, Helene. 2022. "Who We Are". ECMWF. el 11 de mayo de 2022. <https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are>.
- C3S. 2018. "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present". Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/CDS.ADBB2D47>.
- Campozano, Lenin, Daniela Ballari, y Rolando Céleri. 2014. "Imágenes TRMM para identificar patrones de precipitación e índices ENSO en Ecuador". *Maskana* 5:185–91.
- CCA. 2009. "North American Environmental Atlas - Marine Ecoregions, 2008". <http://www.cec.org/es/atlas-ambiental-de-america-del-norte/ecorregiones-marinas/>.
- Chávez, Valeria. 2011. "Determinación experimental del inicio de arrastre de arenas del estado de Quintana Roo, México". Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México.
- CIIFEN. 2022. "El Niño Oscilación del Sur". 2022. <https://ciifen.org/el-nino-oscilacion-del-sur/>.
- CONABIO. 2018. "Línea de costa de la República Mexicana (2011 -2014)". PORTAL DE GEOINFORMACIÓN 2024. 2018. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/dipol/limite/lc2018gw#secc0t2.
- Cooley, Daniel. 2013. "Return Periods and Return Levels Under Climate Change". En *Extremes in A Changing Climate: Detection, Analysis, and Uncertainty*, 97–114. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4479-0_4.
- Han, Jiawei, Micheline Kamber, y Jian Pei. 2012. "10 - Cluster Analysis: Basic Concepts and Methods". En *Data Mining (Third Edition)*, editado por Jiawei Han, Micheline Kamber, y Jian Pei, 443–95. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems. Boston: Morgan Kaufmann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381479-1.00010-1>.

- Hannon, Matthew, John Griffiths, Angus Vantoch-Wood, Max Carcas, Stuart Bradley, Richard Boud, y Stephen Wyatt. 2016. *Marine Energy (World Energy Resources 2016)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24836.73607>.
- Martínez, M. Luisa, Valeria Chávez, Rodolfo Silva, Gisela Heckel, Erika Paola Garduño-Ruiz, Astrid Wojtarowski, Gabriela Vázquez, et al. 2024. “Assessing the Potential of Marine Renewable Energy in Mexico: Socioeconomic Needs, Energy Potential, Environmental Concerns, and Social Perception”. *Sustainability* 16 (16): 7059. <https://doi.org/10.3390/su16167059>.
- NOAA. 2009. “Climate Variability: Southern Oscillation Index”. Climate.Gov. el 30 de agosto de 2009. <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-southern-oscillation-index>.
- . 2013. “In Watching for El Niño and La Niña, NOAA Adapts to Global Warming”. Climate.gov. el 5 de febrero de 2013. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/watching-el-niño-and-la-niña-noaa-adapts-global-warming>.
- . 2015. “Why Are There so Many ENSO Indexes, Instead of Just One?” Climate.Gov. el 29 de enero de 2015. <http://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one>.
- . 2017. “Description of Changes to Ocean Niño Index (ONI)”. Climate Prediction Center. el 18 de septiembre de 2017. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_change.shtml.
- . 2024a. “Cold & Warm Episodes by Season”. Climate Prediction Center. agosto de 2024. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.
- . 2024b. “Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)”. Physical Sciences Laboratory. agosto de 2024. <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>.
- Odériz, Itxaso, Rodolfo Silva, Thomas R. Mortlock, y Edgar Mendoza. 2020. “Climate Drivers of Directional Wave Power on the Mexican Coast”. *Ocean Dynamics* 70 (9): 1253–65. <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01387-z>.
- Raut, Shrishail, Sadegh Modiri, Robert Heinkelmann, Kyriakos Balidakis, Santiago Belda, Chaiyaporn Kitpracha, y Harald Schuh. 2023. “Investigating the Relationship

- Between Length of Day and El-Niño Using Wavelet Coherence Method”. En *Geodesy for a Sustainable Earth*, editado por Jeffrey T. Freymueller y Laura Sánchez, 253–58. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/1345_2022_167.
- SEMARNAT. 2019. “Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018”. México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Informe2018GMX_web.pdf.
- SEP. 2011. *Atlas de Geografía Universal. 8a ed. Distrito Federal: Secretaria de Educación Pública*. 8a ed. Distrito Federal: Secretaria de Educación Pública.
- Silva, Rodolfo. 2005. *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Trenberth, Kevin E. 2019. “El Niño Southern Oscillation (ENSO)”. En *Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition)*, editado por J. Kirk Cochran, Henry J. Bokuniewicz, y Patricia L. Yager, 420–32. Oxford: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.04082-3>.
- Webb, Paul. 2023. *Introduction to Oceanography*. Roger Williams University. <https://rwu.pressbooks.pub/webboceanography/>.

Anexos

Tabla 11. Registro histórico del ONI. Tomada de: (NOAA 2024b).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1950	-1.5	-1.3	-1.2	-1.2	-1.1	-0.9	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8
1951	-0.8	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.2	1	0.8
1952	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0	-0.1	0	0.2	0.1	0	0.1
1953	0.4	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8
1954	0.8	0.5	0	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7	-0.7
1955	-0.7	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-1.1	-1.4	-1.7	-1.5
1956	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4
1957	-0.2	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.5	1.7
1958	1.8	1.7	1.3	0.9	0.7	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
1959	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1	0	0	0
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1960	-0.1	-0.1	-0.1	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1
1961	0	0	0	0.1	0.2	0.3	0.1	-0.1	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2
1962	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4
1963	-0.4	-0.2	0.2	0.3	0.3	0.5	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.3
1964	1.1	0.6	0.1	-0.3	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
1965	-0.6	-0.3	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.2	1.5	1.9	2	2	1.7
1966	1.4	1.2	1	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3
1967	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.2	0	0	-0.2	-0.3	-0.4	-0.3	-0.4
1968	-0.6	-0.7	-0.6	-0.4	0	0.3	0.6	0.5	0.4	0.5	0.7	1
1969	1.1	1.1	0.9	0.8	0.6	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	0.8	0.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1970	0.5	0.3	0.3	0.2	0	-0.3	-0.6	-0.8	-0.8	-0.7	-0.9	-1.1
1971	-1.4	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.9	-1	-0.9
1972	-0.7	-0.4	0.1	0.4	0.7	0.9	1.1	1.4	1.6	1.8	2.1	2.1
1973	1.8	1.2	0.5	-0.1	-0.5	-0.9	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7	-1.9	-2
1974	-1.8	-1.6	-1.2	-1	-0.9	-0.8	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.8	-0.6
1975	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-1	-1.1	-1.2	-1.4	-1.4	-1.6	-1.7
1976	-1.6	-1.2	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	0.8
1977	0.7	0.6	0.3	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8
1978	0.7	0.4	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.1	0
1979	0	0.1	0.2	0.3	0.2	0	0	0.2	0.3	0.5	0.5	0.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1980	0.6	0.5	0.3	0.4	0.5	0.5	0.3	0	-0.1	0	0.1	0
1981	-0.3	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1
1982	0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-0.5	-0.8	-1	-0.9
1984	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.6	-0.9	-1.1
1985	-1	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-0.9	-1.3	-1.3	-1.1	-1.2	-1.5	-1.8	-1.8
1989	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1

Tabla 12. Registro histórico del ONI (continuación). Tomada de: (NOAA 2024b).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1	1.1
1995	1	0.7	0.5	0.3	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.8	-1	-1	-1
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1	0.5	-0.1	-0.8	-1.1	-1.3	-1.4	-1.5	-1.6
1999	-1.5	-1.3	-1.1	-1	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.2	-1.3	-1.5	-1.7
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2000	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
2001	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-0.6	-0.8
2006	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.1	-1.3	-1.5	-1.6
2008	-1.6	-1.5	-1.3	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.7
2009	-0.8	-0.8	-0.6	-0.3	0	0.3	0.5	0.6	0.7	1	1.4	1.6
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1	-1.1	-1
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1	-1
2022	-1	-0.9	-1	-1.1	-1	-0.9	-0.8	-0.9	-1	-1	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2

Tabla 13. Eventos de El Niño.

Evento	Mes inicial	Año inicial	Mes final	Año final	Duración [meses]
1	6	1951	1	1952	8
2	2	1953	2	1954	13
3	4	1957	7	1958	16
4	11	1958	3	1959	5
5	6	1963	2	1964	9
6	5	1965	4	1966	12
7	10	1968	5	1969	8
8	8	1969	1	1970	6
9	5	1972	3	1973	11
10	9	1976	2	1977	6
11	9	1977	1	1978	5
12	10	1979	2	1980	5
13	4	1982	6	1983	15
14	9	1986	2	1988	18
15	5	1991	6	1992	14
16	9	1994	3	1995	7
17	5	1997	5	1998	13
18	6	2002	2	2003	9
19	7	2004	2	2005	8
20	9	2006	1	2007	5
21	7	2009	3	2010	9
22	10	2014	4	2016	19
23	9	2018	6	2019	10
Total					231

Tabla 14. Eventos de La Niña.

Evento	Mes inicial	Año inicial	Mes final	Año final	Duración [meses]
1	5	1954	9	1956	29
2	5	1964	1	1965	9
3	7	1970	1	1972	19
4	5	1973	7	1974	15
5	10	1974	4	1976	19
6	9	1983	1	1984	5
7	10	1984	8	1985	11
8	5	1988	5	1989	13
9	8	1995	3	1996	8
10	7	1998	2	2001	32
11	11	2005	3	2006	5
12	6	2007	6	2008	13
13	11	2008	3	2009	5
14	6	2010	5	2011	12
15	7	2011	4	2012	10
16	8	2016	12	2016	5
17	10	2017	4	2018	7
18	8	2020	5	2021	10
19	8	2021	12	2022	17
Total					244

Tabla 15. Eventos de la fase neutra.

Evento	Mes inicial	Año inicial	Mes final	Año final	Duración [meses]
1	8	1950	5	1951	10
2	2	1952	1	1953	12
3	3	1954	4	1954	2
4	10	1956	3	1957	6
5	8	1958	10	1958	3
6	4	1959	5	1963	50
7	3	1964	4	1964	2
8	2	1965	4	1965	3
9	5	1966	9	1968	29
10	6	1969	7	1969	2
11	2	1970	6	1970	5
12	2	1972	4	1972	3
13	4	1973	4	1973	1
14	8	1974	9	1974	2
15	5	1976	8	1976	4
16	3	1977	8	1977	6
17	2	1978	9	1979	20
18	3	1980	3	1982	25
19	7	1983	8	1983	2
20	2	1984	9	1984	8
21	9	1985	8	1986	12
22	3	1988	4	1988	2
23	6	1989	4	1991	23
24	7	1992	8	1994	26
25	4	1995	7	1995	4
26	4	1996	4	1997	13
27	6	1998	6	1998	1
28	3	2001	5	2002	15
29	3	2003	6	2004	16
30	3	2005	10	2005	8

Tabla 16. Eventos de la fase neutra (continuación).

Evento	Mes inicial	Año inicial	Mes final	Año final	Duración [meses]
31	4	2006	8	2006	5
32	2	2007	5	2007	4
33	7	2008	10	2008	4
34	4	2009	6	2009	3
35	4	2010	5	2010	2
36	6	2011	6	2011	1
37	5	2012	9	2014	29
38	5	2016	7	2016	3
39	1	2017	9	2017	9
40	5	2018	8	2018	4
41	7	2019	7	2020	13
42	6	2021	7	2021	2
Total					394

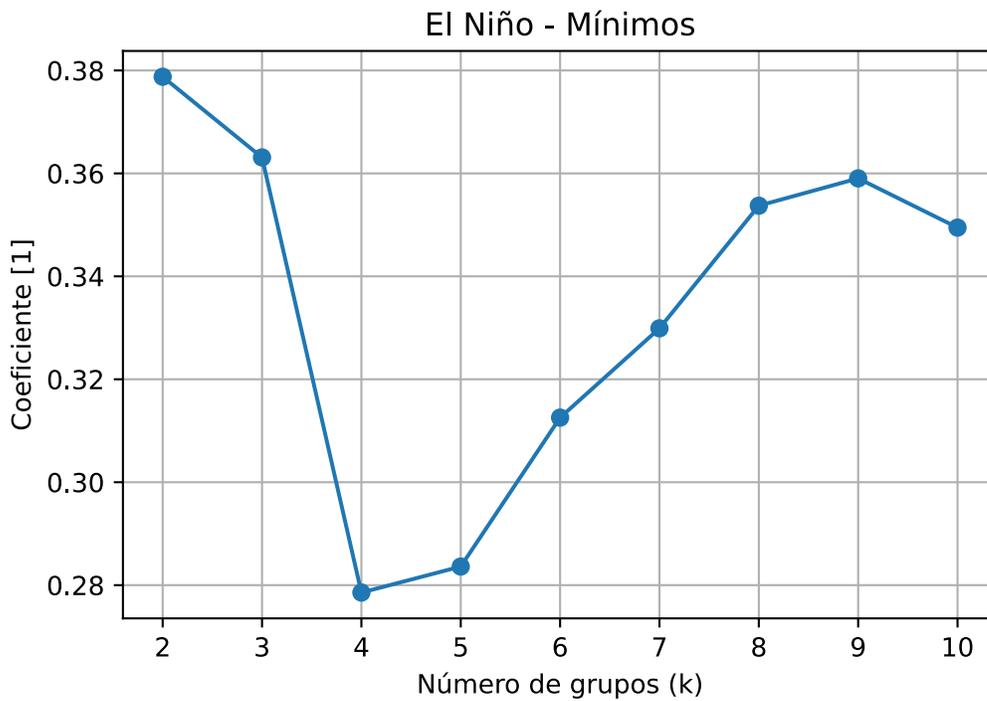


Figura 26. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante El Niño.

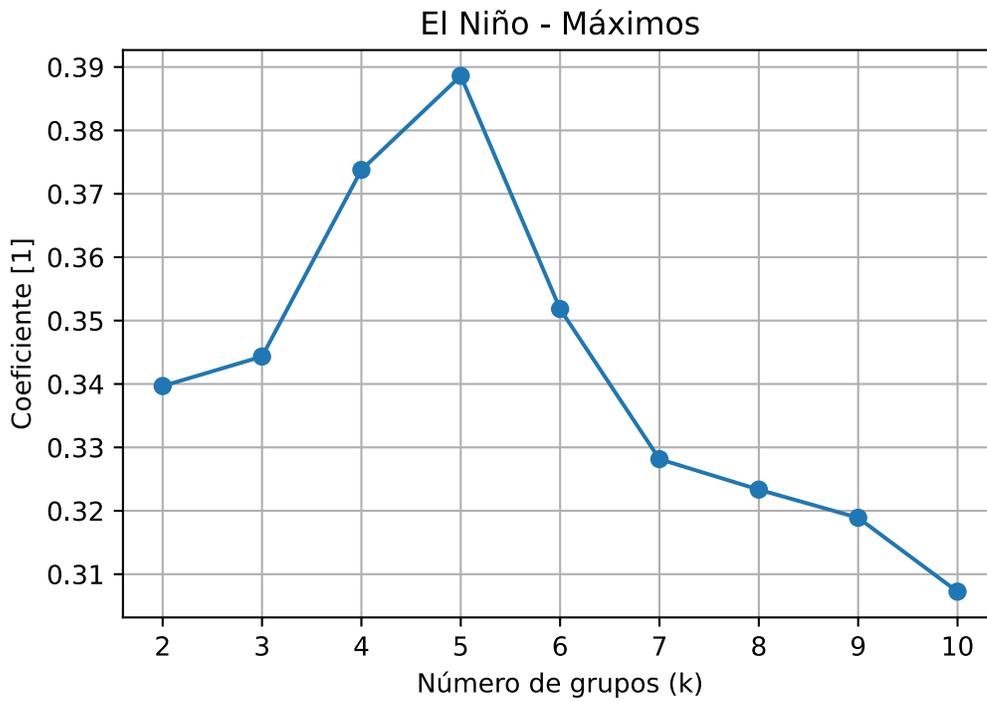


Figura 27. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase de El Niño.

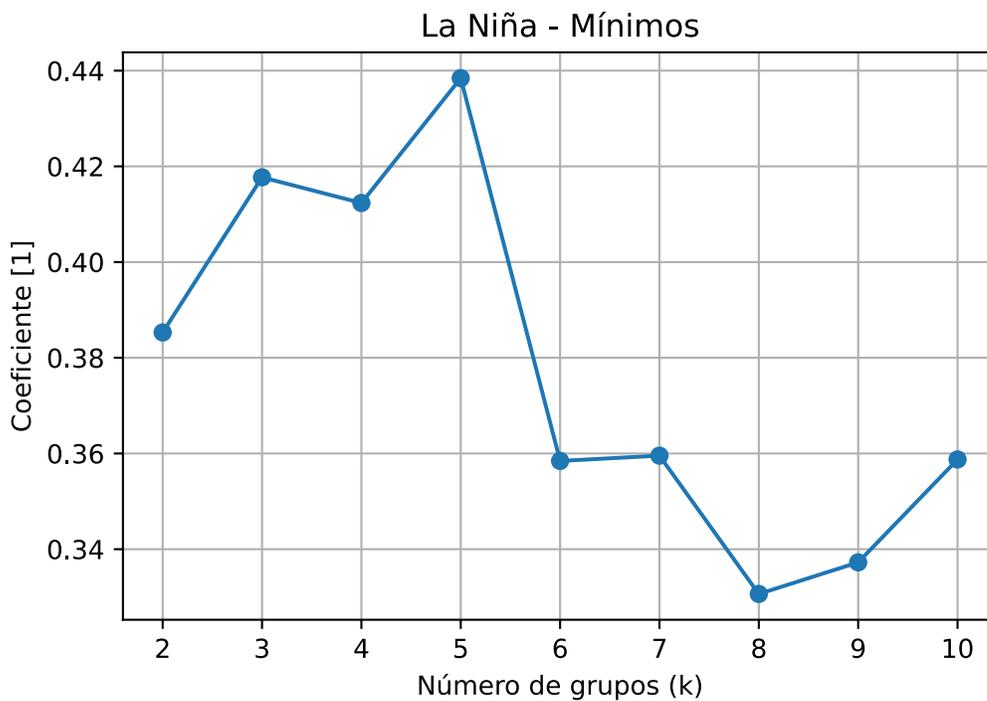


Figura 28. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.

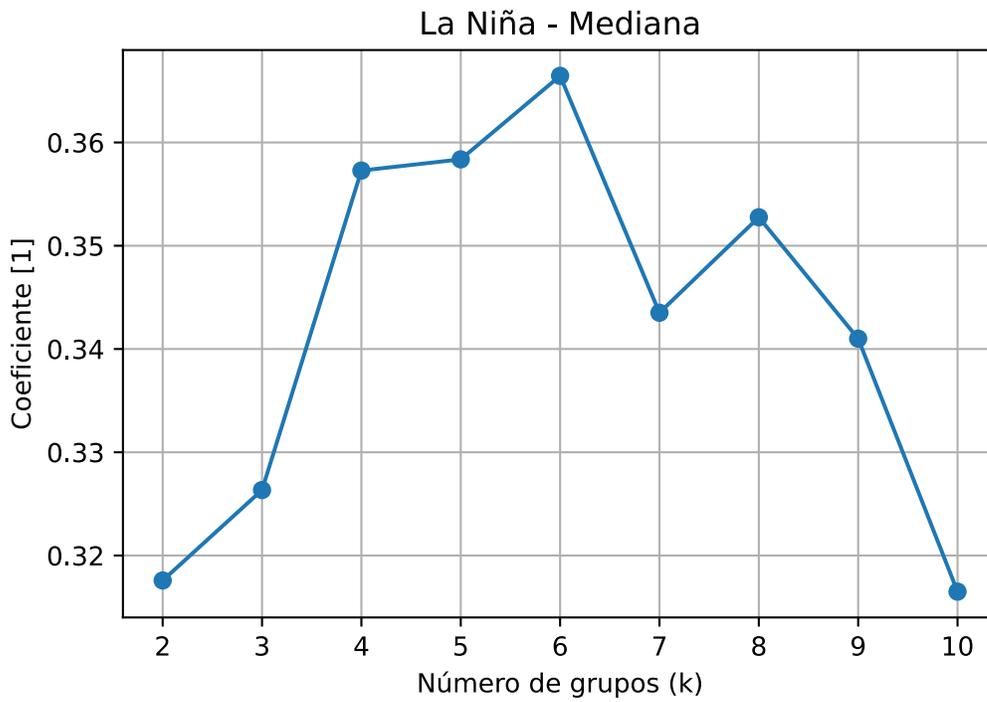


Figura 29. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.

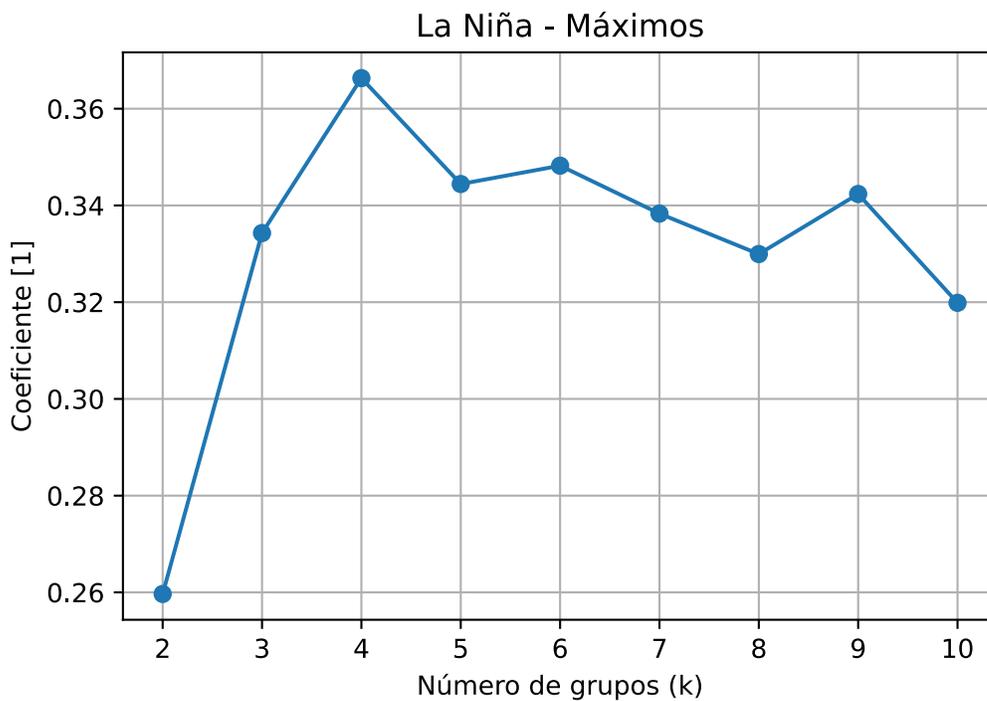


Figura 30. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante La Niña.

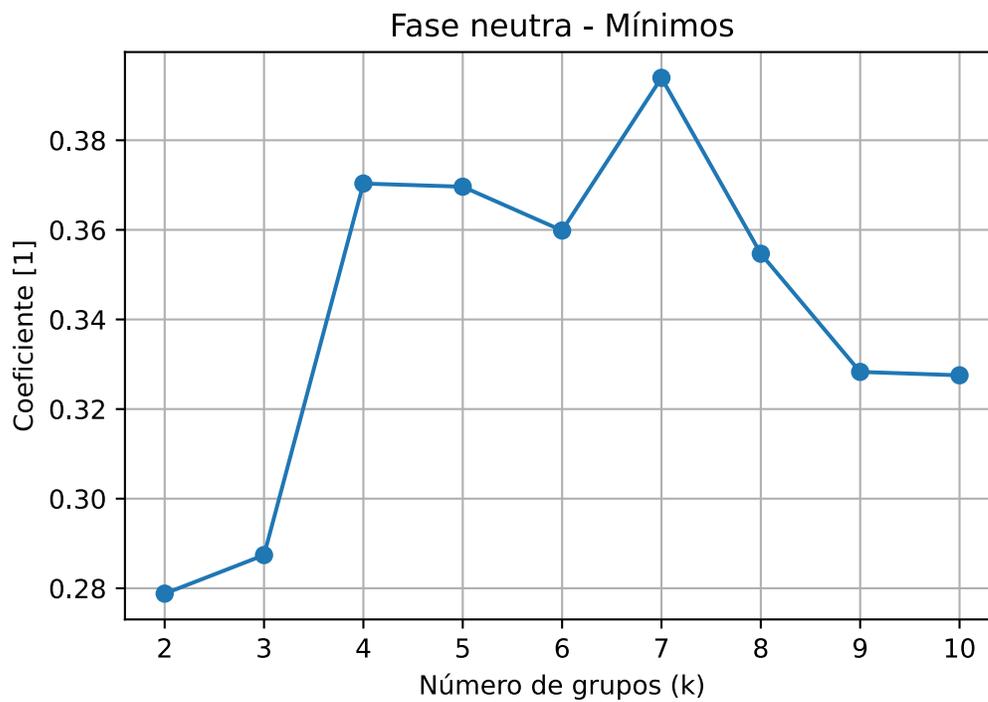


Figura 31. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos mínimos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.

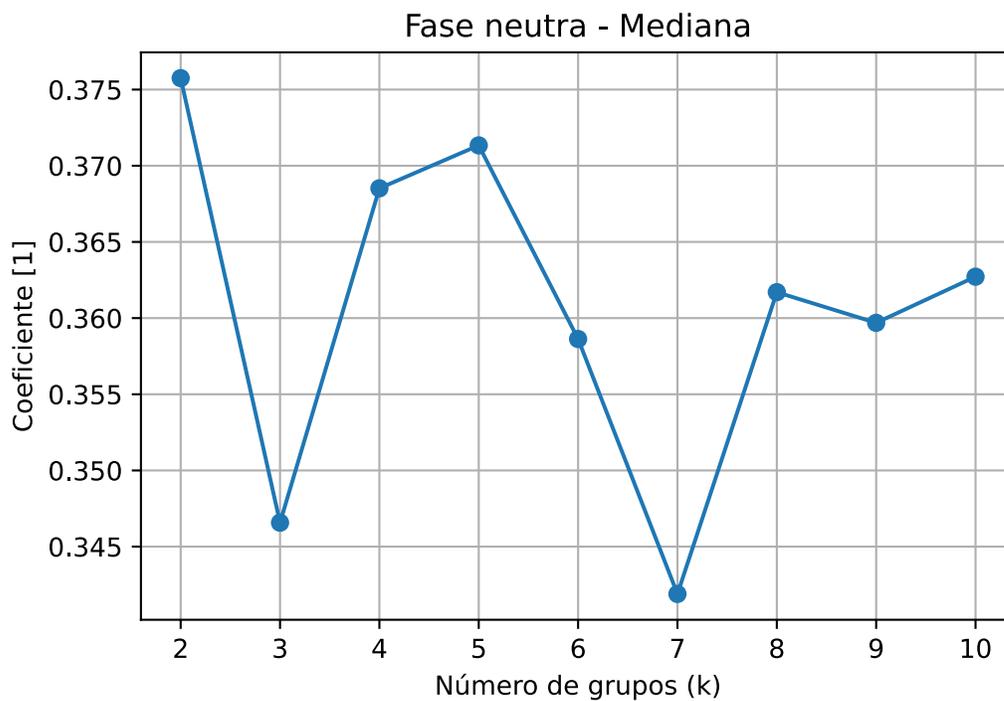


Figura 32. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para la mediana de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.

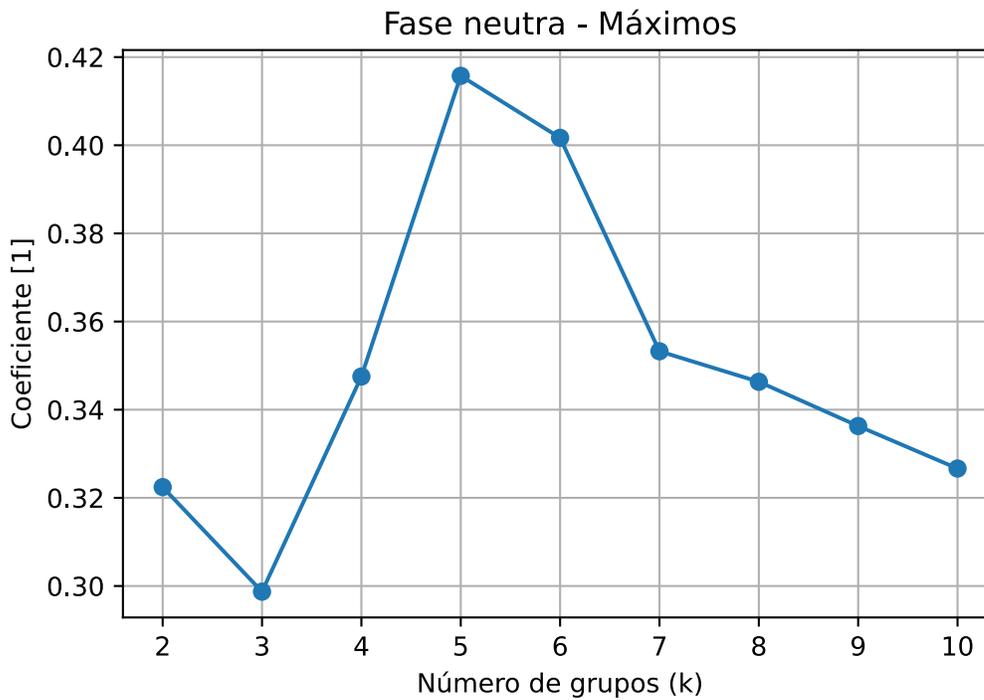


Figura 33. Coeficientes de silueta para agrupaciones de uno a diez clústeres para datos máximos de las potencias de viento y de oleaje durante la fase neutra.

Tabla 17. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante El Niño.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P _{Wind} [W/m ² /año]	P _{Wave} [W/m/año]
1	20.950	-99.728	2.38E-05	5.96E-01
2	23.623	-116.173	2.58E-03	-15.206

Tabla 18. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante El Niño.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P _{Wind} [W/m ² /año]	P _{Wave} [W/m/año]
1	23.795	-93.397	2.85E-02	9.094
2	20.188	-112.339	3.09E-01	53.797

Tabla 19. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante El Niño.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m²/año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	21.189	-92.716	-5.104	-383.693
2	17.285	-108.985	6.809	671.766
3	26.431	-88.491	19.222	664.005
4	27.977	-115.405	7.84E-01	532.237
5	20.667	-115.137	27.285	1420.560

Tabla 20. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante La Niña.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m²/año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	24.273	-93.117	8.10E-05	-0.339
2	18.500	-117.083	-4.94E-03	-25.125
3	17.539	-108.441	3.19E-04	-18.372
4	26.333	-117.278	8.85E-04	-34.021
5	19.158	-114.809	8.67E-03	-24.897

Tabla 21. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante La Niña.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m²/año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	23.420	-89.930	1.12E-01	11.325
2	18.891	-118.059	4.21E-01	38.811
3	18.129	-109.360	1.39E-01	11.380
4	26.313	-116.390	1.95E-01	23.732
5	14.841	-99.473	-7.23E-02	-6.266
6	27.505	-103.366	-1.81E-01	5.901

Tabla 22. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante La Niña.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m²/año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	18.078	-100.652	-9.606	-19.475
2	16.755	-114.192	10.488	520.106
3	25.797	-115.458	7.98E-03	582.388
4	25.147	-90.998	9.532	431.410

Tabla 23. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos mínimos durante la fase neutra.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m ² /año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	19.220	-110.864	2.32E-04	4.563
2	14.827	-99.887	1.79E-05	-16.621
3	17.929	-116.437	7.32E-03	-2.183
4	16.700	-109.717	2.83E-04	-5.510
5	25.618	-114.890	2.14E-04	-2.934
6	30.731	-118.852	-9.26E-06	12.033
7	23.970	-90.707	7.58E-06	6.27E-01

Tabla 24. Centroides de los clústeres para el conjunto de medianas durante la fase neutra.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m ² /año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	22.427	-93.683	1.95E-01	12.936
2	21.070	-113.766	2.87E-01	-7.692

Tabla 25. Centroides de los clústeres para el conjunto de datos máximos durante la fase neutra.

Clúster	Lat [°]	Lon [°]	P_{Wind} [W/m ² /año]	P_{Wave} [W/m/año]
1	20.452	-93.188	-18.618	-770.974
2	21.878	-112.125	16.886	358.741
3	27.323	-117.298	7.35E-01	-20.098
4	24.965	-90.363	-7.25E-03	-60.605
5	16.432	-108.469	-8.40E-01	11.708