



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
BAJA CALIFORNIA.**



**FACULTAD DE CIENCIAS
MARINAS.**

**TENDENCIA DE LA ALTURA DEL OLEAJE EN EL OCÉANO
PACÍFICO.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO EN OCEANOLOGÍA

PRESENTA:

Beatriz Ixetl García Gómez

ENSENADA B.C. MÉXICO A 9 DE AGOSTO DE 2012

“Tendencia de la altura del oleaje en el Océano Pacífico”

TESIS

Que para obtener el título de:

OCEÁNOLOGO

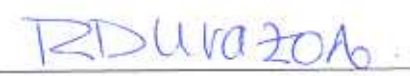
presenta:

Beatriz Ixetl García Gómez

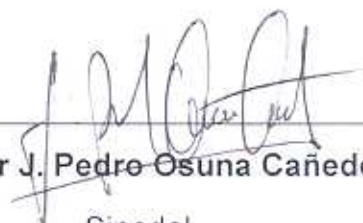
Aprobado por


Dr Francisco Javier Ocampo Torres

Director de Tesis


Dr Reginaldo Durazo Arvizu

Sinodal


Dr J. Pedro Osuna Cañedo

Sinodal

Resumen

Una gran cantidad de variaciones de los fenómenos naturales asociadas a los cambios del clima ocurren a través de la influencia directa de la interacción atmósfera-océano. El oleaje es uno de estos fenómenos, que ocurre en la superficie del mar y por lo tanto una parte esencial en la interacción entre el océano y la atmósfera. Si la altura del oleaje se incrementara por efecto de un cambio en el clima, la zona costera sería directamente afectada. Además, si los eventos extremos tienden a aumentar en frecuencia e intensidad las consecuencias podrían ser mucho más graves para la población. El presente trabajo analizó la posible razón de aumento en la altura del oleaje a lo largo de la costa oeste del continente Americano. La hipótesis sugiere que la altura del oleaje está aumentando en el Océano Pacífico, y la altura del oleaje extremo posee una razón de cambio mayor. Para identificar posibles cambios en la altura del oleaje se utilizaron los resultados de una simulación numérica implementada en el Océano Pacífico con el modelo WAM Ciclo 4.5. El período de estudio abarca 42 años, de febrero de 1968 a diciembre de 2009. Se ubicaron 52 estaciones virtuales a lo largo de la costa oeste de América desde el Golfo de Alaska hasta la Tierra de Fuego. De las 52 estaciones virtuales, 9 se utilizaron para la validación del modelo con datos registrados por boyas de la NOAA- NDBC. A las series de altura del oleaje de las 43 estaciones restantes, se les calculó de forma mensual, estacional y anual los valores estadísticos de promedio y percentiles 95 y 99.5. A cada serie se le estimó la razón de aumento. Los resultados obtenidos variaron notablemente en función de la latitud. A latitudes mayores que 40° se observó que la razón de aumento de altura del oleaje de los eventos extremos y máximos fue mayor que la del oleaje promedio. Este comportamiento se repite en las zonas tropicales. Mientras que para las zonas subtropicales y la intertropical se observó lo contrario, encontrando incluso valores de decremento. Los valores más grandes de razón de cambio encontrados fueron de 1.2 cm/año en Hs promedio, 1.8 cm/año para Hs de eventos extremos y 2.6 cm/año para Hs máxima. Estacionalmente, las razones de cambio más grandes ocurrieron durante el verano en el hemisferio sur y durante el otoño en el norte. El índice NPI tuvo la mejor correlación con la serie de altura de la ola, en el hemisferio norte, con un valor de hasta 0.72. Mientras que los índices MEI, SOI y NOI obtuvieron correlaciones significativas pero ninguna fue mayor que 0.5. En los años que ocurrieron eventos El Niño y La Niña se afectó a la altura del oleaje de manera significativa, en algunos caso tuvo un aumento de hasta un 60% y en otros casos tuvo un decremento de hasta el 25%. En conclusión se observó un incremento en la altura del oleaje en la mayor parte de la costa oeste de América en el período de 1968 a 2009.

Palabras clave: oleaje, cambio en clima, Océano Pacífico.

Agradecimientos:

A mi comité de tesis, Dr. Francisco Ocampo, Dr. Pedro Osuna y Dr. Reginaldo Durazo, por el tiempo dedicado a leer y revisar este trabajo, pero principalmente por su paciencia para poder realizar la tesis.

Principalmente al Dr. Francisco Ocampo por la confianza y el apoyo recibido desde hace mucho tiempo.

Al grupo de oleaje: Paco, Pedro, Hector, Memo, Vlado, Tenoch, Bernardo, Manuel Moni y Carmen que desde hace tanto tiempo me dio la bienvenida a trabajar y me ha brindado su amistad.

A los miembros del “sindicato” :Yai, Liz, Yama, Chiapas, Toño, Ro, Richy, Anaid, Vonne, con los que conviví toda la carrera y me han brindado su amistad y apoyo siempre.

Principalmente a Liz y Yai que me han soportado y ayudado mucho, que siempre están cuando las necesito y cuando no también. Las únicas locas que me siguen la corriente. Gracias por no dejarme caer en esos momentos difíciles.

A Vonne!!! “no la mama” gracias por todos estos años que hemos vivido juntas y todo lo que hemos vivido. Gracias, por todo el apoyo, las regañadas, las comidas, gracias por ser mi hermanita.

A esos amigos que siempre me han ayudado aunque no siempre este presentes: Chuy, Rene, Marquitos, Vere.

Al Angelito que tuvimos la dicha de conocer y nos ha inspirado todos estos años.

A toda mi familia que desde lejos me apoya. A mis niños hermosos: mis primos que son mi motivación para día a día mejorar.

A mis papas. Por el apoyo incondicional que siempre me han brindado y me brindaran. No hay palabras suficientes para agradecerles.

Agradecimiento especial al proyecto pe-oleajePBC (CONACYT-SENER S0019-2009-01).

CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes	4
2	Hipótesis	5
3	Objetivos	6
3.1	Objetivo general	6
3.2	Objetivos específicos	7
4	Área de estudio	7
5	Metodología	8
5.1	Validación del modelo	8
5.2	Series de tiempo	10
6	Resultados	14
6.1	Validación del modelo	14
6.2	Tendencias anuales de la altura del oleaje	15
6.3	Análisis de la variación estacional	22
6.4	Correlación con índices climáticos	26
6.5	Periodogramas	32
7	Discusiones	36
8	Conclusiones	42
9	APÉNDICE A	44
	Referencias	46

FIGURAS

4.1	Dominio numérico en el Océano Pacífico. Los espacios en color blanco son áreas enmascaradas por el modelo.	7
5.1	Localización de boyas NDBC-NOOA, para validación del modelo.	9

5.2	Puntos a lo largo de la costa del continente Americano. Rombos azules son las boyas virtuales utilizadas para la validación del modelo.	11
6.1	Altura del oleaje promedio, extrema y máxima respecto al tiempo. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	15
6.2	Series de tiempo de la altura del oleaje de dos estaciones cerca del Trópico de Capricornio. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	16
6.3	Series de tiempo de altura del oleaje de dos estaciones cerca del Trópico de Cáncer. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	17
6.4	Series de tiempo de la altura del oleaje en dos estaciones subtropicales. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	18
6.5	Series de tiempo de la altura del oleaje en dos estaciones ubicadas al rededor del ecuador. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	19
6.6	Series de tiempo de altura del oleaje en estaciones ubicadas en el hemisferio norte en latitudes altas. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan Hs_p , los verdes Hs_{torm} y los rojos Hs_{max}	20
6.7	Razones de cambio (cm/año) en función de la latitud. La línea azul representa la razón de cambio de Hs_p , Hs_{torm} (línea verde); y Hs_{max} (línea roja)	21
6.8	Valores de las razones de cambio estacionales de Hs_p respecto a la latitud. El invierno se representa con la línea azul; otoño (línea negra); verano (línea roja) y primavera (línea verde). Las estaciones se refieren a la temporada en el hemisferio norte.	22
6.9	Valores de las razones de cambio estacionales de Hs_{torm} respecto a la latitud. El invierno se representa con la línea azul; otoño (línea negra); verano (línea roja) y primavera (línea verde).	23
6.10	Valores de las razones de cambio estacionales de Hs_{max} respecto a la latitud. El invierno se representa con la línea azul; otoño (línea negra); verano (línea roja) y primavera (línea verde).	24

6.11 Razones de cambio de Hs_p en el verano, invierno y anual. La línea azul representa Hs_p de invierno, la línea roja Hs_p del verano y la línea negra punteada las razones de cambio de Hs_p anual.	25
6.12 Valores de correlación de los índices climáticos con Hs_p respecto a la latitud. La línea azul representa el índice NOI, la línea roja SOI, la línea negra NPI y la línea verde el índice MEI. Correlaciones al 95% de significancia.	26
6.13 Anomalía porcentual de Hs_p con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.	29
6.14 Anomalía porcentual de Hs_{torm} con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.	30
6.15 Anomalía porcentual de Hs_{max} con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.	31
6.16 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones del hemisferio sur. La línea vertical indica el intervalo de confianza del 95%.	32
6.17 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones en la zona subtropical. La línea vertical indica el intervalo de confianza del 95%. Estación 7 (roja) y estación 29 (azul)..	33
6.18 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones cerca del ecuador. La línea vertical indica el intervalo de confianza del 95%.	34
6.19 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones ubicadas en los trópicos. La línea vertical indica el intervalo de confianza del 95%. Estación 10 en el Trópico de Capricornio (roja), estación 22 en el Trópico de Cáncer (azul).	35
6.20 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones del hemisferio norte. La línea vertical indica el intervalo de confianza del 95%.	36

TABLAS

I Localización de las boyas y los períodos considerados para la validación de la simulación numérica.	9
II Resultados de la validación del modelo WAM ciclo 4.5. Incluye la posición de la boya, el índice de correlación de Hs, el índice de correlación de Tm y el número de datos evaluados.	14
III Áreas enmascaradas en WAM ciclo 4.5.	45

1. Introducción

El oleaje es un fenómeno que ocurre en la superficie del mar y por lo tanto una parte esencial en la interacción entre el océano y la atmósfera. Las olas son generadas por el efecto del viento sobre la superficie del mar y se mantienen por fuerzas restauradoras como la gravedad. Una vez generado, el oleaje puede propagarse por distancias muy grandes con una pérdida de energía relativamente pequeña, desplazándose libremente hasta llegar a las costas donde rompe y disipa su energía (Knauss, 1996).

En la actualidad el desarrollo de diversas actividades en la zona costera tales como la pesca, el transporte y tránsito marítimo, la explotación petrolera, las operaciones de puertos, la construcción de estructuras marinas, requieren de información sobre la climatología del oleaje en una escala oceánica y local (Lizano *et al.*, 2001).

Clima es lo que se espera que ocurra en la atmosfera u océano en cualquier momento del año basándose en estadísticas construidas por un largo período de tiempo. Aunque las estadísticas se centran en los valores promedio, los análisis incluyen a los eventos extremos y a pesar de darle mayor importancia a los primeros, es esencial evaluar el impacto antropogénico de los sucesos extremos (Burroughs, 2001).

Los procesos de un cambio en el clima actúan en diversas escalas temporales que van desde ciclos estacionales hasta decadales o aún mayores y también a diferentes escalas espaciales, desde globales hasta sistemas locales. Una gran cantidad de variaciones de los fenómenos naturales asociadas a los cambios del clima ocurren a través de la influencia directa de la interacción atmósfera-océano pero aún no se comprenden del todo. Los cambios en la presión atmosférica a nivel del mar están estrechamente relacionados con los cambios en los vientos superficiales, así como los cambios de la temperatura superficial, flujos de calor y profundidad de la capa de mezcla. A través de todas estas relaciones la presión atmosférica juega un papel muy importante influyendo y definiendo el cambio del clima en el océano.

Sobre el tema del cambio del clima se han estudiado principalmente parámetros individuales tales como la temperatura y el aumento en las precipitaciones usualmente relacionados con cambios más generales como esos asociados a los patrones de circulación, el calentamiento global, etc., sin embargo existen otras variables poco observadas como la velocidad del viento y la altura del oleaje que juegan también un papel importante en las variaciones cíclicas ya que son mecanismos significativos en el intercambio de energía entre la atmósfera y el océano.

Si la velocidad del viento y el oleaje poseen una tendencia de aumento la zona costera será directamente afectada, ya sea simplemente en cambios de la línea de costa o dañando las estructuras de protección. Además, si los eventos extremos tienden a aumentar en frecuencia e intensidad las consecuencias podrían ser mucho más graves para la población (inundaciones, daños a puertos, hoteles, marinas, embarcaciones y en general a la economía local). Por estas razones es de gran importancia estudiar los efectos a largo plazo en la intensidad, frecuencia y ubicación de tormentas y eventos extremos.

Para identificar eventos climáticos importantes como El Niño y La Niña (ENSO), se han desarrollado diversos índices climáticos basados en la presión a nivel del mar, por ejemplo: El índice de Oscilación del Sur, la Oscilación del Atlántico Norte y el Índice del Pacífico Norte.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos de los índices.

El Índice del Pacífico Norte (NPI) está definido como el área ponderada bajo la presión atmosférica a nivel del mar en la región entre los 30- 65°N y 160- 140°E. Este índice explica desde variaciones interanuales hasta decadales en la circulación atmosférica de la región. Este índice se fundamenta en las anomalías promedio de tres centros de presión (Trenberth y Hurrell, 1994).

El índice de Oscilación del Sur (SOI) se basa en la diferencia promedio de las anomalías de la presión a nivel del mar en un sitio en la zona subtropical al sureste del Pacífico (Tahití) y otra en el Pacífico oeste en (Darwin, Australia). Estas localidades son utilizadas porque la oscilación que ocurre entre ellas,

representa o se relaciona con una serie de variaciones climáticas que suceden en la zona del Pacífico tropical (Schwing *et al.*, 2002a).

El Índice de la Oscilación del Norte es un índice de reciente creación (2002) y tiene un fundamento parecido al SOI, sin embargo describe fenómenos diferentes. Este índice se calcula con la diferencia de las anomalías en la presión a nivel del mar entre el centro de baja presión en el Pacífico oeste (Darwin) y el centro de alta presión en el noreste del Pacífico, ubicado a los 30° N y 130° O. Este índice posee buenas correlaciones con algunos eventos físico que ocurren en la zona extra tropical del Pacífico norte (Schwing *et al.*, 2002b).

El índice Multivariado del ENSO está basado en la presión atmosférica a nivel del mar y la temperatura superficial del mar. Se utiliza la diferencia de presiones entre Tahití y Darwin para la variable de presión a nivel del mar. Para la temperatura superficial del mar se utiliza una base de datos de la diferencia de temperatura superficial del mar en todo el mundo, esta base de datos tiene una resolución de 1° x 1°. Este índice, al incluir dos componentes en el mismo análisis describe mejor el comportamiento del fenómeno ENSO, que los que incluyen sólo una variable como el Niño 3.4 o el SOI. Al poseer datos de una serie de tiempo larga (1871-2005) el índice puede ser confiable en los cambios temporales y no sólo en el espacio como es el caso de otros índices relacionados al ENSO (Wolter y Timlin, 2011).

El manejo de zonas costeras requiere de cierto conocimiento sobre la energía que arriba a la costa, para este propósito se realizan mediciones y estudios. Sin embargo por los altos costos de operación y el corto tiempo que llevan realizándose mediciones, es necesario buscar otra fuente de información. En la actualidad una herramienta confiable para determinar la energía que llega a la costa es la predicción del oleaje por medio de modelos numéricos.

La mayoría de los modelos numéricos de predicción del oleaje están basados en la ecuación de balance de energía y se clasifican como de primera, segunda y tercera generación. Los denominados de primera generación fueron desarrollados en la década de 1960 a 1970, pero sólo consideraban las

interacciones lineales entre ondas y cada componente espectral evolucionaba independientemente, por lo tanto sólo podían resolver parcialmente la ecuación de balance de energía y obtener un espectro de energía incompleto.

Los modelos de segunda generación fueron impulsados a partir del proyecto JONSWAP a mediados de la década de 1970. Estos ya consideraban las interacciones no-lineales, importantes en el oleaje en desarrollo, pero aún poseen limitaciones en la parametrización de este proceso. Estos prototipos generan espectros direccionales (Khandekar, 1989).

En los modelos de tercera generación se implementaron varios rasgos importantes como: una parametrización para la formulación exacta que explica la transferencia no lineal entre cuatro componentes del espectro del oleaje y el balance energético se volvió estable al especificar la función de disipación. Estos modelos fueron desarrollados a mediados de la década de 1980 y la primera implementación fue realizada por el grupo de investigadores WAMDI Group. Con estos modelos se pueden representar explícitamente los principales procesos físicos que determinan la evolución del oleaje y describir completamente el estado del mar en dos dimensiones (Komen *et al.*, 1996).

En esta tesis se utiliza el modelo WAM Ciclo 4.5 (Günther *et al.*, 1992; Günther, 2006), un modelo numérico de tercera generación que para resolver la ecuación de transporte de energía utiliza un método de diferencias finitas. Esta implementación contiene 40 bandas de frecuencia distribuidas logaritmicamente desde 0.026 Hz hasta 1.07 Hz y 36 direcciones con un $\Delta\theta = 10^\circ$. El modelo genera espectros direccionales proporcionándonos información más precisa sobre la evolución de la energía.

La estimación de la energía del oleaje que arriba a las costas de Baja California, así como la climatología y tendencia de este fenómeno, son temas fundamentales para el proyecto “Determinación del potencial energético del oleaje en la costa de la Península de Baja California (pe-oleajePBC)” a cargo del Laboratorio de Oleaje de CICESE. El objetivo principal de este proyecto es determinar el potencial energético del oleaje como fuente de energía renovable para la generación de electricidad en la costa oeste de la Península. Durante el

proyecto se realizan simulaciones numéricas y mediciones continuas en el área de interés. Con los datos obtenidos de las mediciones será posible validar los modelos numéricos y así generar una climatología del oleaje confiable para estimar el potencial energético disponible y tener la posibilidad de analizar la variabilidad espacial y temporal del fenómeno.

1.1 Antecedentes

El clima del oleaje en el Pacífico y el Atlántico se ha estudiado desde hace algunos años y algunos investigadores han encontrado una tendencia de aumento de la altura de la ola, principalmente de las olas de tormenta (Bacon y Carter, 1991, en el Atlántico; Allan y Komar, 2000, en el Pacífico). Sin embargo la mayoría de estos estudios están limitados al hemisferio norte donde se encuentran mediciones continuas de boyas del Centro Nacional de Datos de Boyas (NDBC por sus siglas en inglés) y de la base de datos del ICOADS (Conjunto Internacional de Datos Generales de Océano-Atmósfera), por lo tanto también se limitan a un período relativamente corto de observación (últimas tres décadas).

Como consecuencia de diversos estudios realizados en el Océano Atlántico para determinar tendencias del clima del oleaje, Allan y Komar (2000) realizaron el primer estudio sobre la tendencia en el Océano Pacífico. En este trabajo se analizaron datos de seis boyas del NDBC que han funcionado continuamente entre California y el Golfo de Alaska, encontrando una tendencia de aumento de la altura significativa de la ola en la mayoría de las series de tiempo y con mayor énfasis en latitudes altas (Alaska, Washington y Oregon). Los mayores valores se la razón de aumento son de 0.042 m/año durante el invierno y de 0.027 m/año en promedio anual en la estación de Washington.

Graham y Díaz (2001) realizaron un análisis de la variabilidad de los ciclones, el viento, temperatura superficial del mar y olas en el Pacífico Norte. Respecto al oleaje, realizaron una simulación de 50 años y analizaron datos de tres boyas de la NOAA y encontraron una tendencia de aumento de altura de ola mayor en los eventos extremos que en el promedio de esta variable.

Se publicaron investigaciones realizadas en el hemisferio norte sobre la tendencia del viento y el oleaje (Wang y Swail, 2001; Gullev y Grigorieva, 2004). En ambos estudios se utilizaron datos ICOADS. Ellos reportaron una tendencia promedio de 0.029 m/año de altura de ola. En estas observaciones además se realizó una correlación de las series de altura significativa con el Índice de Oscilación del Niño, el del Pacífico Norte, el del Atlántico Norte y el Índice de Oscilación del Sur encontrando una correlación mayor al 50% con los índices correspondientes a la zona norte.

Recientemente, Ruggiero *et al.* (2010) se enfocaron en las diferencias de la tendencia entre eventos extremos y el promedio de altura de la ola en las boyas de Oregon y Washington. Obtuvieron una tendencia en los eventos extremos hasta tres veces mayor a la del promedio de altura de la ola. Estos autores sugieren continuar con la investigación de este comportamiento en diferentes zonas con el fin de obtener la información necesaria para predecir la magnitud de los eventos extremos y así tener un mejor manejo costero.

2. Hipótesis

La altura del oleaje ha aumentado en los últimos 42 años y esta razón de cambio posee una dependencia con la latitud. El oleaje de tormenta tiene una razón de aumento mayor que la altura de oleaje promedio.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

El objetivo de este trabajo es identificar la razón de cambio de la altura del oleaje de tormenta a lo largo de la costa occidental del continente Americano a través de los resultados de una simulación numérica implementada en el Océano Pacífico en un periodo de 42 años.

3.2 Objetivos específicos

- Describir la razón de aumento de la altura del oleaje promedio y de tormenta tanto en el Pacífico Norte como en el Sur.
- Describir el comportamiento de la razón de aumento de la altura del oleaje en función de la latitud
- Describir las diferencias de las tendencias estacionales
- Analizar la potencial asociación entre la razón de cambio de la altura del oleaje con el comportamiento de algunos índices climáticos.

4. Área de estudio

El área de estudio comprende la costa occidental del continente Americano, desde el Golfo de Alaska hasta la Tierra de Fuego. El modelo numérico se implementó en una malla computacional que cubre el Océano Pacífico en el siguiente dominio geográfico: -72° a 68° en latitud y -120° a -60° en longitud, con una resolución espacial regular de 1° .

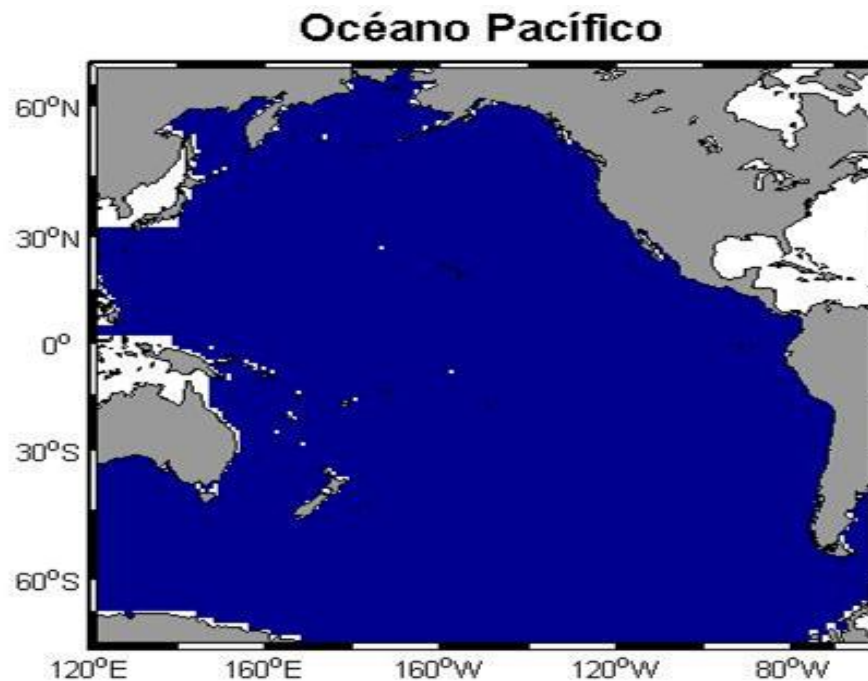


Figura 4.1 Dominio numérico en el Océano Pacífico. Los espacios en color blanco son áreas enmascaradas por el modelo.

5. Metodología

Como parte del proyecto pe-oleajePBC se realizó una simulación numérica en el Océano Pacífico utilizando el modelo WAM Ciclo 4.5 (Komen *et al.*, 1996). El modelo WAM se puede implementar en cualquier dominio regional o global dado un conjunto de datos topográficos prescritos y la resolución en espacio y tiempo puede ser variable. El modelo calcula la evolución espacial y temporal del espectro direccional, con lo cual se pueden obtener parámetros del oleaje como: la altura significativa, periodo promedio, periodo asociado al pico espectral, dirección promedio, dirección asociada al máximo de energía, entre otros; y algunas variables relacionadas al campo de viento como: campos de esfuerzo y coeficiente de arrastre.

Algunos detalles sobre la implementación del modelo numérico se encuentran en el apéndice A.

5.1 Validación del modelo.

Las mediciones registradas por las boyas de la NOAA-NDBC constituyen datos obtenidos *in situ*, en series de tiempo extensas y continuas, por lo tanto pueden ser utilizadas para realizar validaciones de resultados de modelos numéricos. Los datos fueron obtenidos del sitio electrónico del NDBC y se seleccionaron nueve boyas que se encuentran en el norte del Océano Pacífico.

Las coordenadas de estas boyas se muestran en la Tabla I y su localización se muestra en la figura 5.1. Para el análisis se utilizaron los datos horarios en el periodo más largo de registro correspondiente a cada boya.

Tabla I. Localización de las boyas y los periodos considerados para la validación de la simulación numérica.

Boya	Latitud (grados)	Longitud (grados)	ID mapa	Periodo
51004	17.59 N	152.38 W	1	1984-2009
46047	32.43 N	119.84 W	2	1991-2009
46053	34.24 N	119.84 W	3	1994-2009
46026	37.75 N	122.84 W	4	1982-2009
46059	38.047 N	129.96 W	5	1994-2009
46006	40.75 N	137.46 W	6	1977-2009
46002	42.58 N	130.47 W	7	1975-2009
46005	46.10 N	131.00 W	8	1976-2009
46001	56.30 N	148.02 W	9	1972-2009

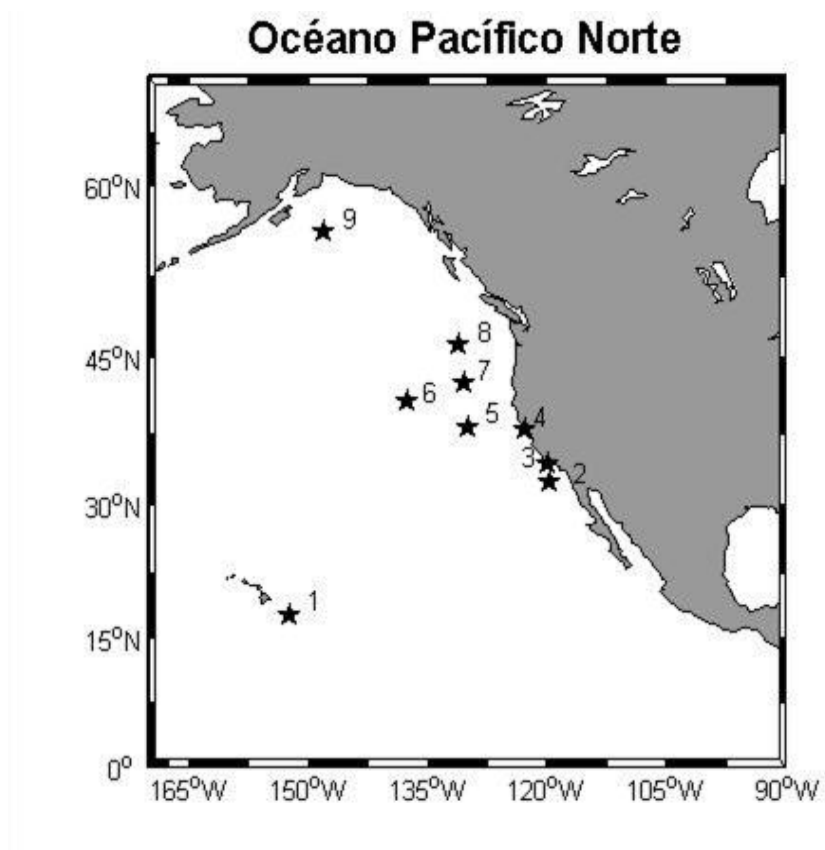


Figura 5.1. Localización de boyas NDBC-NOOA, para validación del modelo.

Las boyas registran las siguientes variables: dirección e intensidad del viento a 10 m sobre el nivel medio del mar, dirección e intensidad de la ráfaga, altura significativa del oleaje, período dominante del oleaje, período promedio del oleaje, dirección promedio del oleaje, presión barométrica, temperatura del aire, temperatura superficial del mar, temperatura de punto de rocío, visibilidad y presión atmosférica. En este trabajo únicamente se utilizaron los datos de período promedio y la altura significativa

Se interpolaron los resultados del modelo numérico para obtener una serie de tiempo de altura significativa de la ola (H_s) y periodo promedio (T_m), en las coordenadas geográficas y a los tiempos de cada boya del NDBC.

La validación del modelo se realizó comparando estas series obtenidas con su correspondiente serie de tiempo medida por la boya. A partir de esta comparación de datos, se realizó una regresión lineal y se calculó el coeficiente de correlación (R) correspondiente.

5.2 Series de tiempo.

Para el análisis y evaluación de la tendencia del clima del oleaje se eligieron los resultados de un total de 52 boyas virtuales localizadas a lo largo del Pacífico Este, cerca de la costa del continente Americano. De los 52 puntos, 9 fueron situados en las coordenadas de las boyas reales de la NDBC y utilizados para la validación del modelo. Las 43 boyas virtuales restantes fueron ubicadas a una distancia mínima a la costa de un grado para evitar la subestimación de energía en estas posiciones. Esta subestimación de energía se debe a que los modelos de olas generalmente configura a sus costas como condiciones de frontera que absorben la energía incidente, sin embargo cuando el oleaje viaja paralelamente a la costa existe una pérdida irreal de energía debido al esquema de propagación de cuadrantes en los nodos cerca de la frontera (Cavaleri & Sclavo, 1998).

Las estaciones virtuales se ubican desde el Golfo de Alaska hasta la Tierra de Fuego. Las posiciones de cada estación se indican en la figura 5.2.

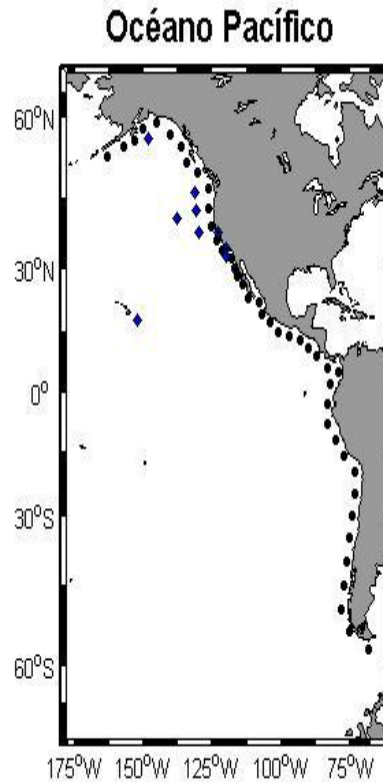


Figura 5.2. Puntos a lo largo de la costa del continente Americano. Rombos azules son las boyas virtuales utilizadas para la validación del modelo.

A cada serie de tiempo de H_s se le calculó de forma mensual, estacional y anual, los valores estadísticos de promedio y los percentiles 95 y 99.5 con el fin de evaluar las diferentes tendencias.

La media o promedio de una serie de datos se calcula con la siguiente expresión:

$$H_{s_p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{s_i}$$

donde x_i es cada valor de altura significativa de oleaje y N es la cantidad de datos. La serie promedio se define desde este momento como H_{s_p} .

Los percentiles son los 99 valores que dividen la serie de datos en 100 partes iguales y dan los valores correspondientes del 1%, al 2%, etc. Para calcular los percentiles de las series se utiliza la siguiente expresión:

$$Hs_k = L_i + \frac{\frac{kN}{100} - F_{i-1}}{f_i} a_i$$

donde k es valor del percentil que se quiere calcular, L_i es el límite inferior, N es la cantidad total de datos, F_{i-1} es la frecuencia acumulada anterior a la clase del percentil, a_i es la amplitud de la clase y f_i es la frecuencia de la clase donde se encuentra el percentil.

Se eligió el percentil 95 que, según Graham y Díaz (2001) constituye las olas de tormenta o las menos ocurrentes, estas olas pueden ser representadas por el rango del percentil 90 al 99 (Ruggiero *et al.*, 2010). La serie del percentil 95, correspondiente a los eventos extremos se define en este trabajo como Hs_{torm} , y la serie del percentil 99.5 representa los valores máximos del periodo y se define como Hs_{max} .

Los valores estacionales se calcularon utilizando los siguientes períodos asociados a las temporadas en el hemisferio norte: primavera (21 de marzo- 20 de junio), verano (21 junio-22 septiembre), otoño (23 septiembre-20 diciembre) e invierno (21 diciembre-20 marzo). Aunque de esta forma fueron calculadas las estaciones, para la presentación de algunos resultados se corrige la temporada correspondiente a cada hemisferio.

La tendencia o razón de aumento es el cambio medio que se produce en la altura del oleaje por año, estación o mes. Para calcular la razón de cambio de la altura del oleaje se realizó una regresión lineal de la serie de tiempo de la altura del oleaje. Las tendencias reportadas fueron calculadas con un intervalo de confianza del 95%.

Las series mensuales de Hs se compararon con los siguientes índices climáticos: Índice de Oscilación del Sur (SOI por sus siglas en ingles), Índice de

Oscilación del Norte (NOI), índice del Pacífico Norte Americano (PNA), el Índice Oceánico del Niño (ONI), Índice del Pacífico Norte (NPI), Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y el Índice Multivariado ENSO (MEI). Esto tiene como fin encontrar alguna coincidencia en la periodicidad de la serie con algún ciclo natural del océano y explicar así la tendencia obtenida.

La fuente de los valores de los índices es:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>

Se calculó la correlación lineal entre los índices y las series mensuales de Hs. El coeficiente de correlación se puede expresar de la siguiente manera:

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_x S_y} = \frac{C_{xy}}{S_x S_y}$$

donde C_{xy} es la covarianza entre las series, y S_x y S_y son las desviaciones estándar de los datos. Este coeficiente nos indica la relación entre dos o más variables, es un número adimensional y los valores fluctúan entre 1 y -1. Dado que la covarianza está dividida por la desviación estándar, el valor de R es independiente de la escala de las variables (Emery y Thomson, 2004).

Para observar los cambios de la altura del oleaje se realizó un diagrama de Hoffmüller con las anomalías de las series de tiempo de H_{sp} , H_{storn} y H_{smax} . Este diagrama se realizó calculando la diferencia entre el promedio temporal y los valores anuales de cada serie. Los datos se presentan en forma porcentual para poder observar mejor los cambios, es decir, a la diferencia obtenida se le dividió entre el promedio y se multiplicó por cien.

Otro método utilizado para observar periodicidad en los valores de altura del oleaje fue realizar un espectro en frecuencias de la serie de tiempo en cada punto. A estas series primero se les filtraron las altas frecuencias, es decir se realizó un promedio corrido para quitar periodicidad del oleaje menor a dos meses. Posteriormente se le calculó un espectro a la serie para observar los períodos más energéticos de la serie y asociado a algún evento cíclico.

El espectro se realizó utilizando una ventana de Blackman-Harris y aplicándole una transformada de Fourier a la serie. Se promediaron 2 bandas de frecuencia por lo que la estimación espectral contiene 4 grados de libertad.

6. Resultados

6.1 Validación del modelo.

La validación del modelo se realizó a partir de los datos registrados por 9 boyas de la NDBC y su comparación con los resultados del modelo numérico. Se calculó el coeficiente de correlación existente entre la altura del oleaje medida por las boyas y la obtenida por el modelo numérico. El coeficiente de correlación indica la relación lineal entre dos variables aleatorias. Un valor de $R \rightarrow 1$ indica una buena relación entre las variables, cuando $R \rightarrow 0$ las series son diferentes. La tabla II muestra los resultados de este análisis.

Tabla II Resultados de la validación del modelo WAM ciclo 4.5. Incluye la posición de la boya, el índice de correlación de Hs, el índice de correlación de Tm y el número de datos evaluados.

Boya	Posición	R Hs	R Tm	n
51004	17.59 N 152.38 W	0.753	0.6751	227928
46047	32.43 N 119.84 W	0.7829	0.7172	166560
46053	34.24 N 119.84 W	0.6839	0.4527	140256
46026	37.74 N 122.84 W	0.7551	0.5911	245448
46059	38.04 N 129.96 W	0.8512	0.7542	140256
46006	40.75 N 137.46 W	0.8708	0.7425	289272
46002	42.58 N 130.47 W	0.8441	0.7331	306816
46005	46.10 N 131.00 W	0.8530	0.7175	298056
46001	56.30 N 148.02 W	0.8239	0.6766	333120

Los índices de correlación de H_s muestran, en su mayoría, valores superiores a 0.8 por lo que para fines del presente trabajo podemos decir que se simula correctamente la altura del oleaje.

Las bajas correlaciones entre los períodos promedio obtenidos por el modelo y los medidos por las boyas, se pueden atribuir a la baja resolución del viento utilizado para forzar el modelo. Esta resolución del viento proporciona poca energía al oleaje con altas frecuencias, por lo que la energía se centra en el oleaje de bajas frecuencias y genera un sesgo hacia estos datos.

6.2 Tendencias anuales de la altura del oleaje.

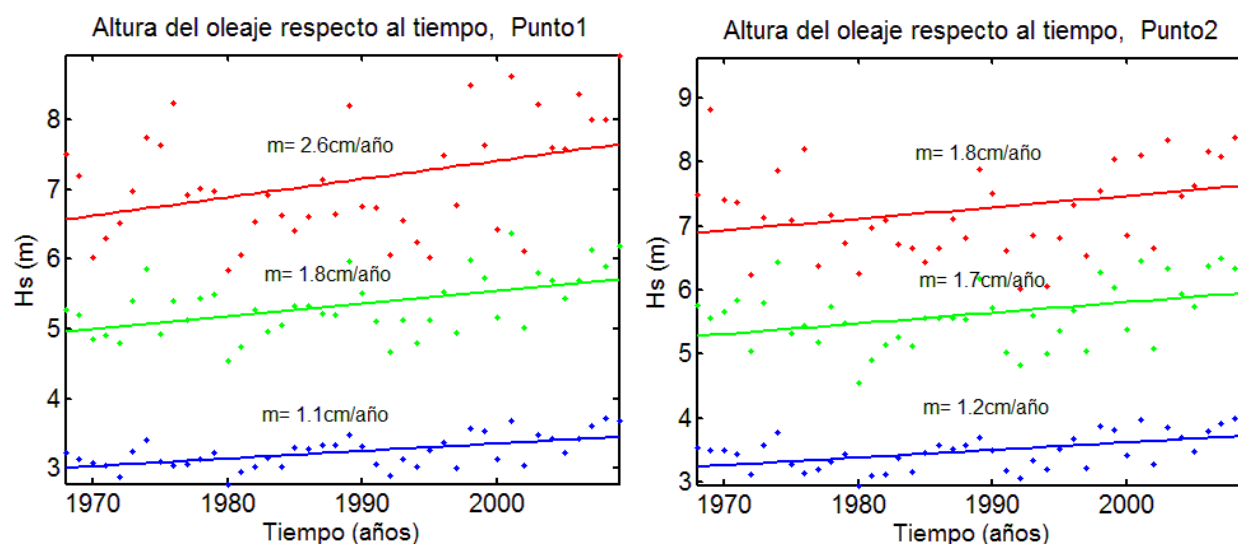


Figura 6.1 Altura del oleaje promedio, extrema y máxima respecto al tiempo. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{s_p} , los verdes $H_{s_{torm}}$ y los rojos $H_{s_{max}}$.

La figura 6.1 representa las series de tiempo de altura del oleaje correspondientes a dos estaciones (1 y 2) ubicadas en el hemisferio sur, cerca de la costa de Chile a una latitud de -57° y -54° respectivamente. En estas dos estaciones se observan las razones de cambio más grandes de las tres series de tiempo. Las tendencias $H_{s_{max}}$ tuvieron valores de 2.6 y 1.8 cm/año y las tendencias de $H_{s_{torm}}$ fueron de 1.8 y 1.7 cm/año, mientras que las tendencias del H_{s_p} , fueron mu-

cho menores, de 1.1 y 1.2 cm /año. Este comportamiento donde la razón de cambio de $H_{s_{\text{torm}}}$ y $H_{s_{\text{max}}}$ es mayor a la de H_{s_p} se observa en todas las estaciones ubicadas a una latitud mayor que 40° en el hemisferio sur. En el hemisferio norte se observa un comportamiento parecido en latitudes mayores que 40° , sin embargo las tendencias tiene valores más pequeños, los resultados de esta zona se describirán más adelante.

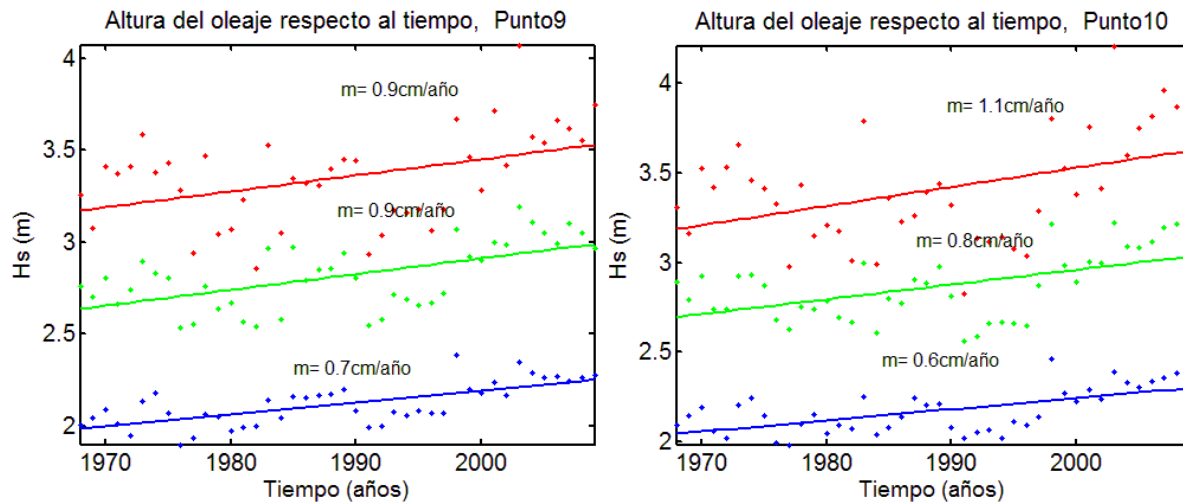


Figura 6.2 Series de tiempo de la altura del oleaje de dos estaciones cerca del Trópico de Capricornio. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{s_p} ; los verdes $H_{s_{\text{torm}}}$; y los rojos $H_{s_{\text{max}}}$.

La gráfica anterior (figura 6.2) representa las series de tiempo de H_s de dos puntos cercanos al Trópico de Capricornio a una latitud de -20° y -16° . Estas dos estaciones muestran una razón de cambio positiva para las tres series de tiempo, al igual que los puntos entre las latitudes 24° y 10° sur. Esta zona alrededor del trópico se caracteriza por tener tendencias con pendientes notablemente mayores a los de latitudes cercanas (entre los 24 y 40° sur o las estaciones cercanas al ecuador). En estas gráficas se observa que las razones de cambio de $H_{s_{\text{torm}}}$ y de $H_{s_{\text{max}}}$ fueron mayores a las de H_{s_p} lo cual nos puede indicar un aumento en la intensidad o número de tormentas tropicales. En la estación 10 en $H_{s_{\text{max}}}$ se pue-

den distinguir algunos valores sobresalientes muy altos o muy bajos que coinciden con eventos El Niño o La Niña (ENSO).

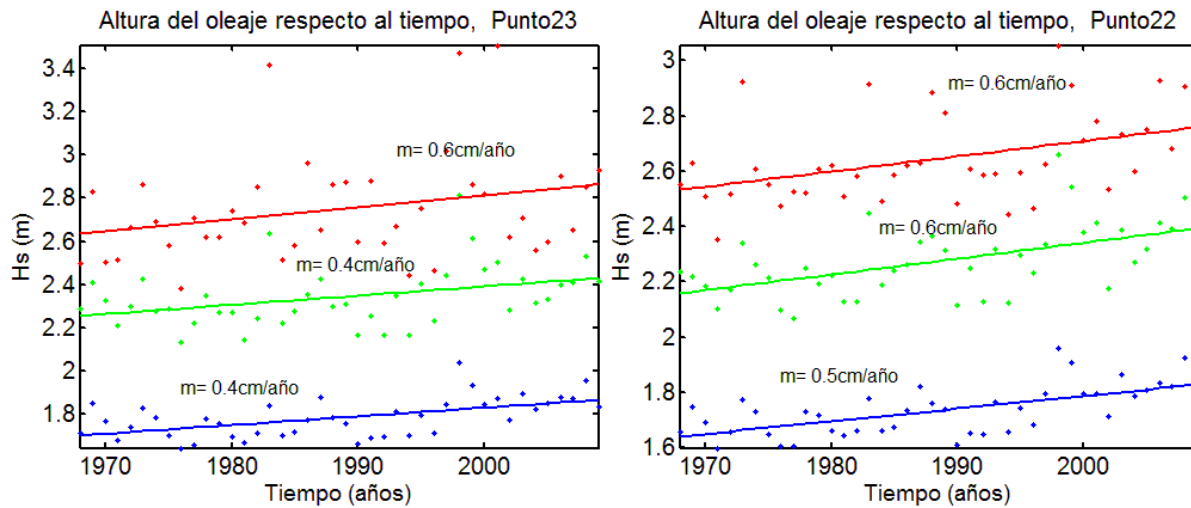


Figura 6.3 Series de tiempo de altura del oleaje de dos estaciones cerca del Trópico de Cáncer. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{s_p} , los verdes $H_{s_{torm}}$ y los rojos $H_{s_{max}}$.

La figura 6.3 representa los resultados del oleaje generado alrededor del Trópico de Cáncer, estas dos estaciones (22 y 23) se encuentran a una latitud de 17° y 19° respectivamente pero se consideraron como las representativas de la zona ya que las estaciones más cercanas al trópico estaban en una zona protegida (dentro del Golfo de California). En estas estaciones podemos observar que las razones de cambio de $H_{s_{torm}}$ y $H_{s_{max}}$ son mayores que la de H_{s_p} , y con la característica de que son mayores a las razones de cambio en latitudes subtropicales y cercanas al ecuador. Esto puede indicarnos dos cosas; que la cantidad de eventos extremos en esta zona está aumentando, o la intensidad de las tormentas tiende a aumentar. Cualquiera de las dos situaciones sugiere consecuencias negativas para la zona costera. En estas dos estaciones podemos también observar los valores que destacan en altura durante algunos eventos ENSO, en este caso los valores sobresalientes se pueden observar tanto en la serie de máximos y extremos como en los valores promedio.

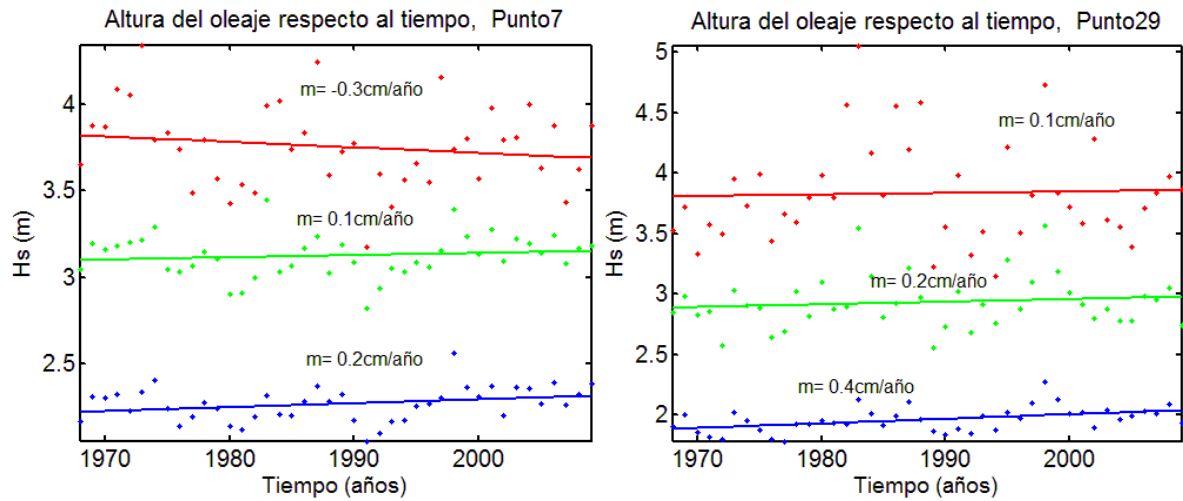


Figura 6.4. Series de tiempo de la altura del oleaje en dos estaciones subtropicales. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{s_p} , los verdes $H_{s_{torm}}$; y los rojos $H_{s_{max}}$

La figura 6.4 corresponde a los resultados de altura del oleaje en dos estaciones ubicadas en la zona subtropical. La estación 7 se sitúa al sur del Trópico de Capricornio a -30° en latitud y a 32° se ubica la estación 29 al norte del Trópico de Cáncer. En estas dos estaciones se observa que la razón de cambio de $H_{s_{torm}}$ y $H_{s_{max}}$ es menor que la de H_{s_p} , incluso con valores negativos. Este comportamiento se observa en la mayoría de las estaciones ubicadas entre las latitudes de 25° y 40° en ambos hemisferios. De igual forma podemos notar este comportamiento en las series de tiempo de los puntos ubicados alrededor del ecuador.

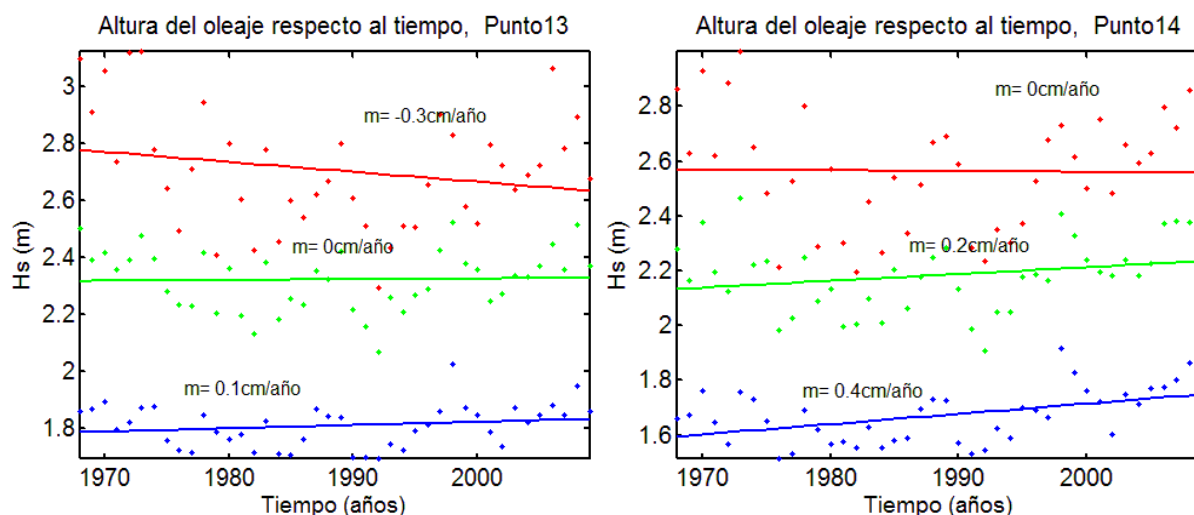


Figura 6.5 Series de tiempo de la altura del oleaje en dos estaciones ubicadas al rededor del ecuador. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{sp} , los verdes H_{storn} , y los rojos H_{smax}

En la figura 6.5 se muestran las series de tiempo de altura del oleaje en las estaciones más cercanas al ecuador y donde se puede observar que la razón de cambio de H_{sp} es mayor que la de H_{storn} y H_{smax} . En estos resultados también se pueden observar los valores sobresalientes en la serie de eventos máximos y que están relacionados a eventos El Niño y La Niña.

En el hemisferio norte, en latitudes altas, las razones de cambio se comportan de forma similar al hemisferio sur, pero con valores menores. Las razones de aumento más grandes en el hemisferio norte son hasta de 1.1 cm/año en H_{smax} , 0.7 cm/año en H_{storn} y 0.4 cm/año en H_{sp} . En la figura 6.6 se exponen los resultados correspondientes a dos estaciones representativas del hemisferio norte en latitudes altas. Es importante recalcar que a pesar de que las pendientes son menores, la altura del oleaje en esta zona es más alto que en el hemisferio sur y mucho mayor que en la zona intertropical, por lo tanto una tendencia de aumento tiene mayor impacto en la costa.

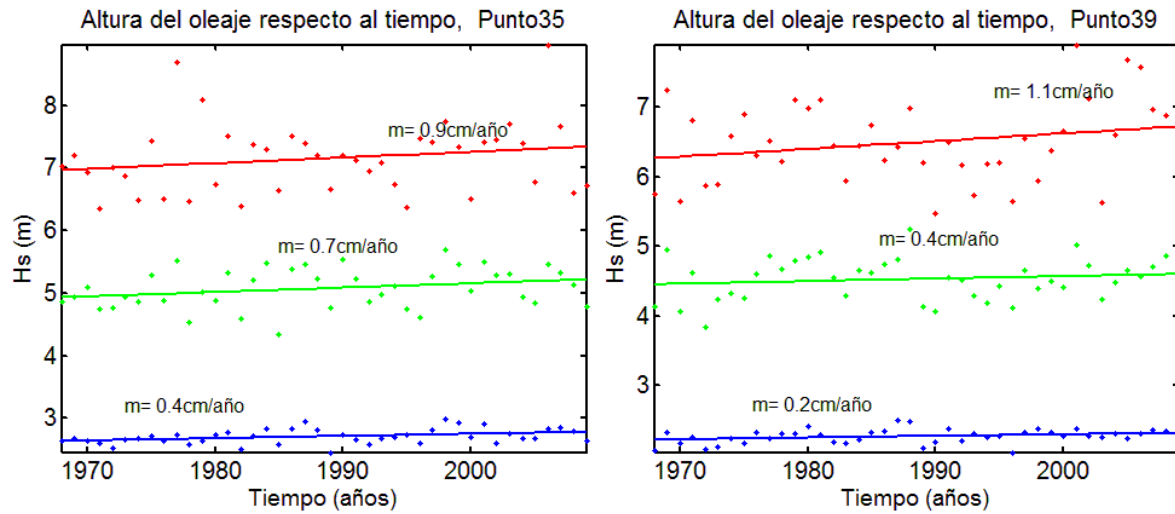


Figura 6.6. Series de tiempo de altura del oleaje en estaciones ubicadas en el hemisferio norte en latitudes altas. La línea representa la regresión lineal de los datos. Los valores azules representan H_{sp} , los verdes H_{storm} , y los rojos H_{smax} .

También es importante recalcar que en la mayor parte del hemisferio norte se pueden observar valores sobresalientes de altura del oleaje en las series de H_{smax} que ocurren en años correspondientes a eventos ENSO, principalmente los ocurridos en 1983 y 1999.

En la figura 6.7 se describe el comportamiento de la razón de cambio de H_s respecto a la latitud. Se compara el comportamiento de las tendencias de H_{sp} , H_{storm} y H_{smax} .

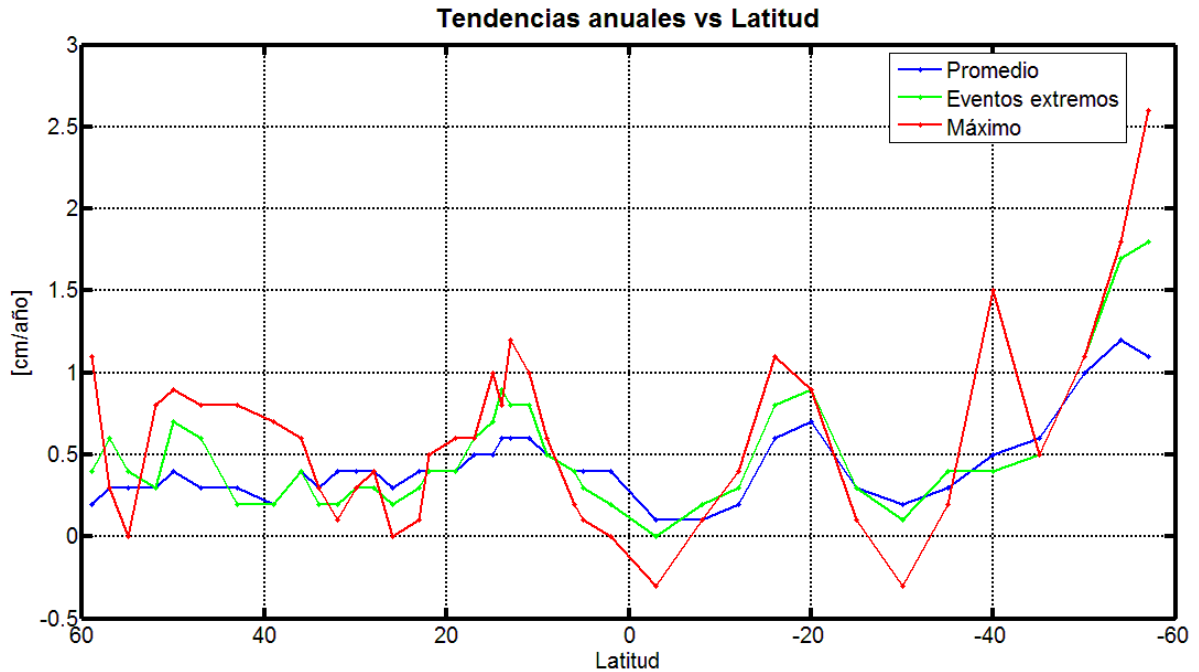


Figura 6.7. Razones de cambio (cm/año) en función de la latitud. La línea azul representa la razón de cambio de H_{sp} H_{storm} (línea verde); y H_{max} (línea roja).

En esta gráfica (figura 6.7) se observa que la razón de cambio de la altura del oleaje es siempre positiva en las series de H_{sp} y H_{storm} . En el caso de H_{max} , observamos algunas tendencias negativas alrededor del ecuador y puntos específicos en la zona subtropical. El comportamiento general de las razones de cambio respecto a la latitud se describe a continuación.

En ambos hemisferios, a latitudes mayores que 40° se observa que las razones de aumento de H_{storm} y H_{max} poseen comportamientos muy parecidos y con valores mayores a los de H_{sp} . De igual forma y con una mayor diferencia entre los valores de las tendencias, ocurre en la zona cercana a los trópicos entre los 25° y 10° en latitud. Sin embargo, un comportamiento contrario ocurre en la zona de convergencia intertropical y subtropical, donde las razones de cambio H_{sp} son mayores que las de H_{storm} y H_{max} . Las razones de cambio más grandes para las tres series se observaron en el hemisferio sur a una latitud mayor que 50° .

6.3 Análisis de la variación estacional

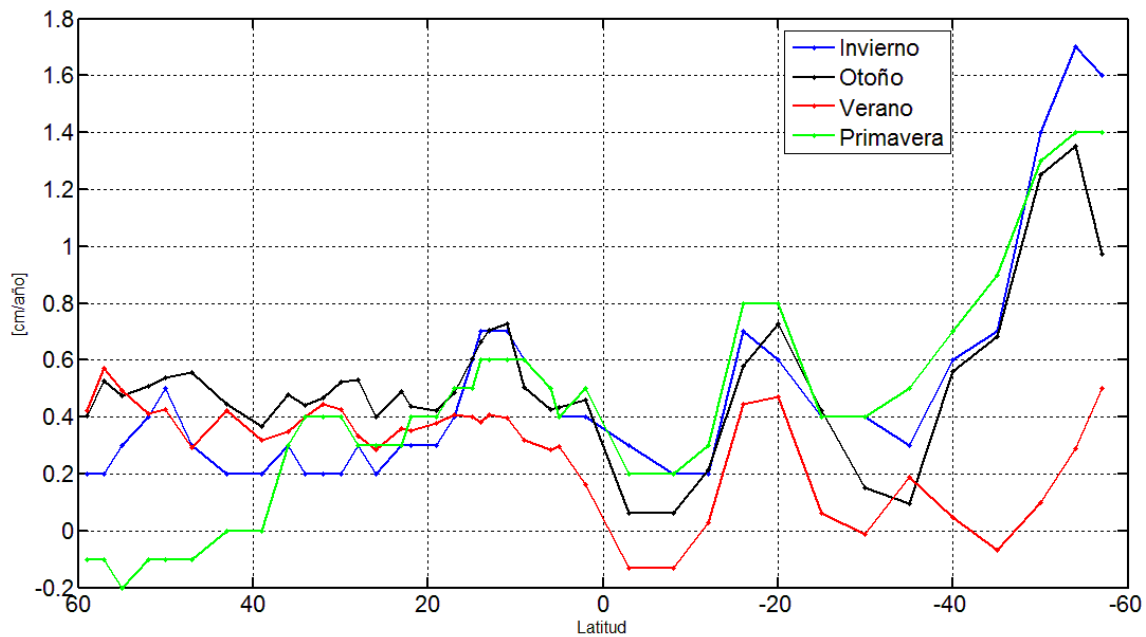


Figura 6.8. Valores de las razones de cambio estacionales de H_{sp} respecto a la latitud. El invierno se representa con la línea azul; otoño (línea negra); verano (línea roja) y primavera (línea verde).

Las estaciones se refieren a la temporada en el hemisferio norte.

En la figura 6.8 se observan las razones de cambio estacional de H_{sp} respecto a la latitud. Se puede distinguir que la razón de aumento es mayor en el hemisferio sur en las estaciones de otoño, invierno y primavera, mientras que el verano presenta las tendencias más pequeñas, esto es interesante, ya que se esperaba que en la estación de verano (invierno en el sur) se produjeran las tendencias más grandes ya que es la temporada de tormentas. La relación entre las cuatro estaciones presenta un comportamiento muy parecido desde los 60° Sur hasta los 20° Norte donde las razones de cambio son mas pequeñas durante la temporada de julio a septiembre (verano en el norte), las mayores son en los meses de marzo a julio (primavera) y durante el invierno y otoño las tendencias poseen valores intermedios. A latitudes mayores que 20°N la relación varía, las razones de cambio durante la primavera disminuyen respecto a la latitud hasta volverse negativas y

las mayores tendencias son durante el otoño. En esta gráfica podemos observar también un comportamiento parecido al de la serie de H_{sp} anual, donde había razones de cambio con valores altos en las zonas alrededor de los trópicos y una disminución de las tendencias en la zona intertropical y subtropical. Es importante recalcar que las tendencias durante la estación de invierno fueron en general de los valores más bajos, contrario a la hipótesis propuesta.

En la gráfica 6.9 se representan las razones de cambio de H_{storm} estacionales respecto a la latitud. El comportamiento de estas tendencias respecto a la latitud es muy parecido al de las series de tiempo anuales, es decir, los valores de razón de cambio más grandes se observan en latitudes mayores que 40° , los valores más pequeños son alrededor del ecuador y en latitudes medias.

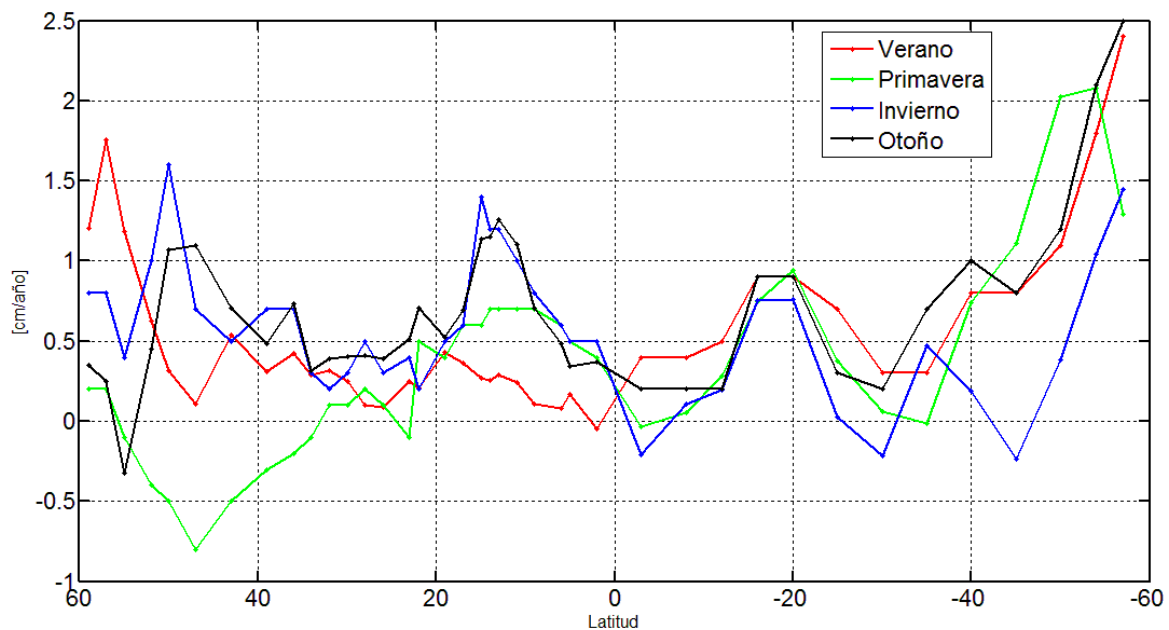


Figura 6.9. Valores de las razones de cambio estacionales de H_{storm} respecto a la latitud. El invierno se representa con la línea azul; otoño (línea negra); verano (línea roja) y primavera (línea verde).

En esta figura es importante mencionar el comportamiento de la razón de cambio de verano e invierno. Se observa que en el hemisferio norte las tendencias durante el invierno poseen valores altos respecto a las otras estaciones, con pendientes mayores a 0.5 cm/año en su mayoría, sin embargo hacia el sur del ecuador estas pendientes decaen incluso a valores negativos. A latitudes mayores que 50° podemos observar valores grandes de $H_{s_{\text{torm}}}$ durante el invierno pero aún así estos son valores pequeños respecto a las otras estaciones del año. Las razones de cambio durante la estación de verano se comportan opuestamente al invierno, es decir en el hemisferio norte poseen valores menores a 0.5 cm/año, excepto a latitudes mayores que 50°, y hacia el sur del ecuador comienzan a aumentar hasta poseer un valor máximo de 2.4 cm/año. Como observamos estas razones de cambio poseen valores más altos que los calculados en las series anuales. La razón de cambio más alta calculada para $H_{s_{\text{max}}}$ anual fue de 2.6 cm/año, mientras que la razón de aumento más grande para $H_{s_{\text{max}}}$ estacional es de 5.4 cm/año. En la figura 6.10 se muestra el comportamiento de las razones de cambio de $H_{s_{\text{max}}}$ estacionales, respecto a la latitud.

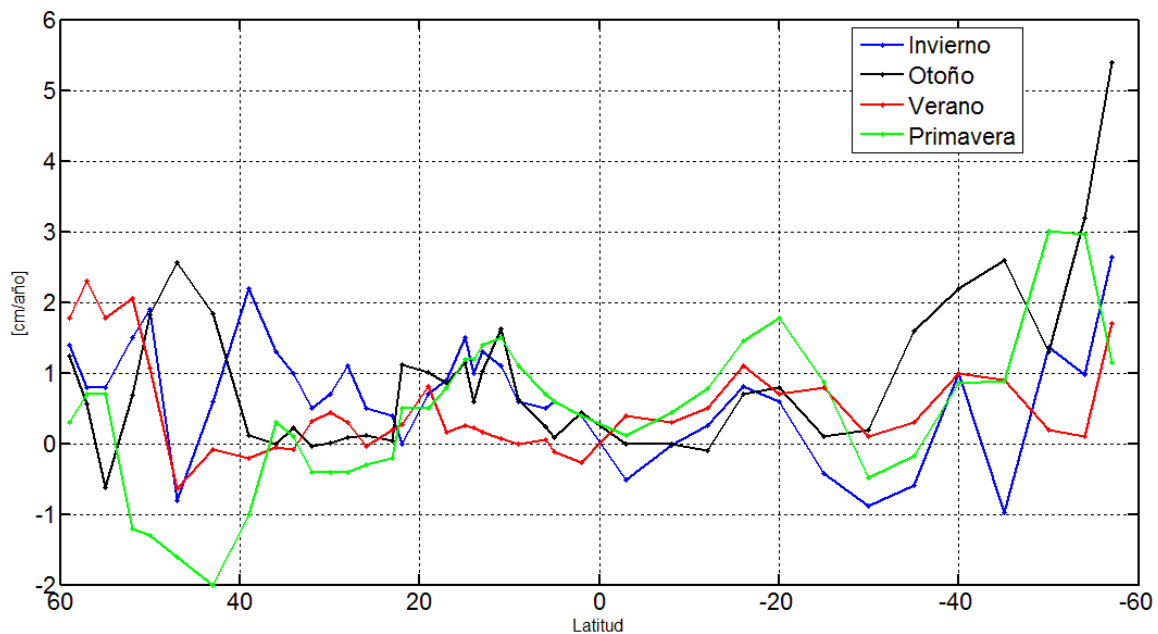


Figura 6.10. Valores de las tendencias de los valores máximos estacionales respecto a la latitud. La línea azul representa el invierno, línea negra representa otoño, la línea roja el verano y la línea verde las tendencias de primavera.

Las razones de aumento de $H_{s_{\max}}$ estacional, poseen una variación mayor, con valores mucho más grandes a las de H_{s_p} y $H_{s_{\text{torm}}}$ pero también con una mayor cantidad de valores negativos. En el hemisferio sur existen tendencias hasta de 5.4 cm/año en otoño y de -1 cm/año durante el invierno. En el hemisferio norte el valor máximo es de 2.56 cm/año en otoño y el mínimo es durante la primavera con un valor hasta de -2 cm/año. El comportamiento general es parecido a las razones de cambio de las otras series de H_s , con los valores más altos a latitudes mayores que 40° y alrededor de los trópicos, y valores pequeños en la zona subtropical e intertropical.

En la figura 6.11 se observan las razones de cambio de H_{s_p} de verano, invierno y anual.

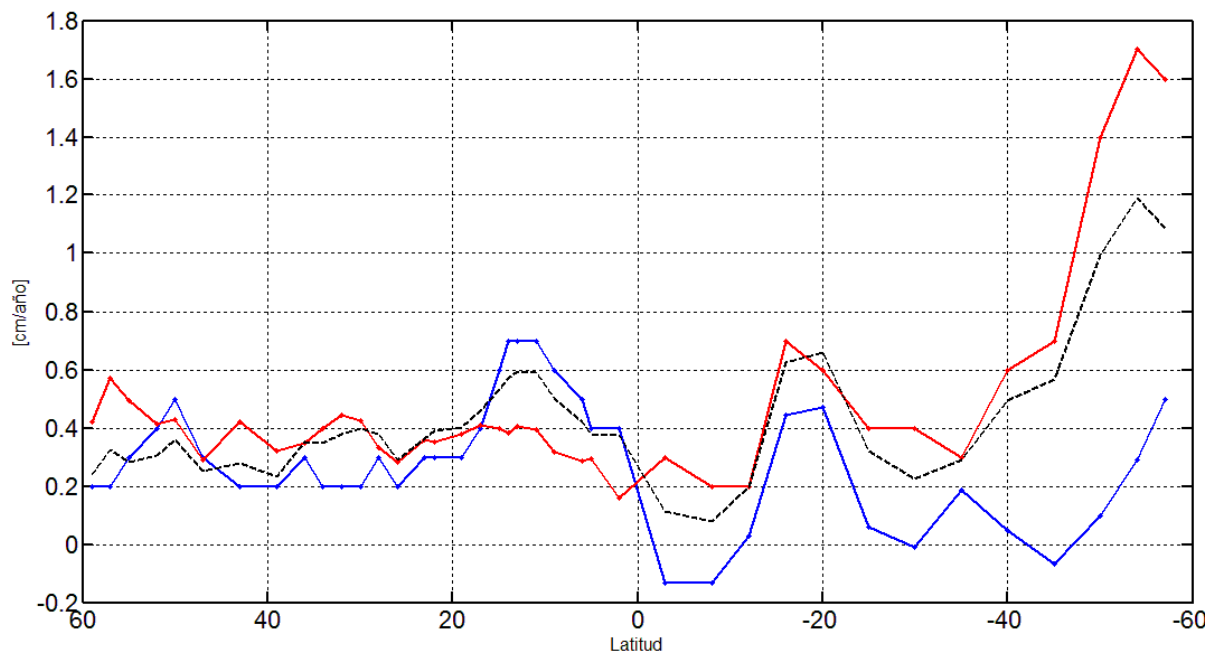


Figura 6.11. Razones de cambio de H_{s_p} en verano, invierno y anual, respecto a la latitud. La línea azul representa H_{s_p} de invierno, la línea roja H_{s_p} del verano y la línea negra punteada las razones de cambio de H_{s_p} anual.

En la gráfica 6.11 se comparan los comportamientos latitudinales de las razones de cambio de H_{s_p} anual con los H_{s_p} del verano e invierno. Se observa

que las tendencias durante el verano son las más grandes y las del invierno son las más pequeñas, esto sucede en casi todas las latitudes excepto entre lo 0° y 18° N, donde el comportamiento es inverso. En general la razón de cambio de H_{sp} anual tiene valores intermedios a las de verano e invierno, sin embargo entre las latitudes 45° y 55°N la tendencia del promedio anual es la más pequeña.

6.4 Correlación con índices climáticos.

Para explicar los cambios de altura del oleaje a lo largo de los años se realizó un análisis comparativo con diversos índices climáticos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.12.

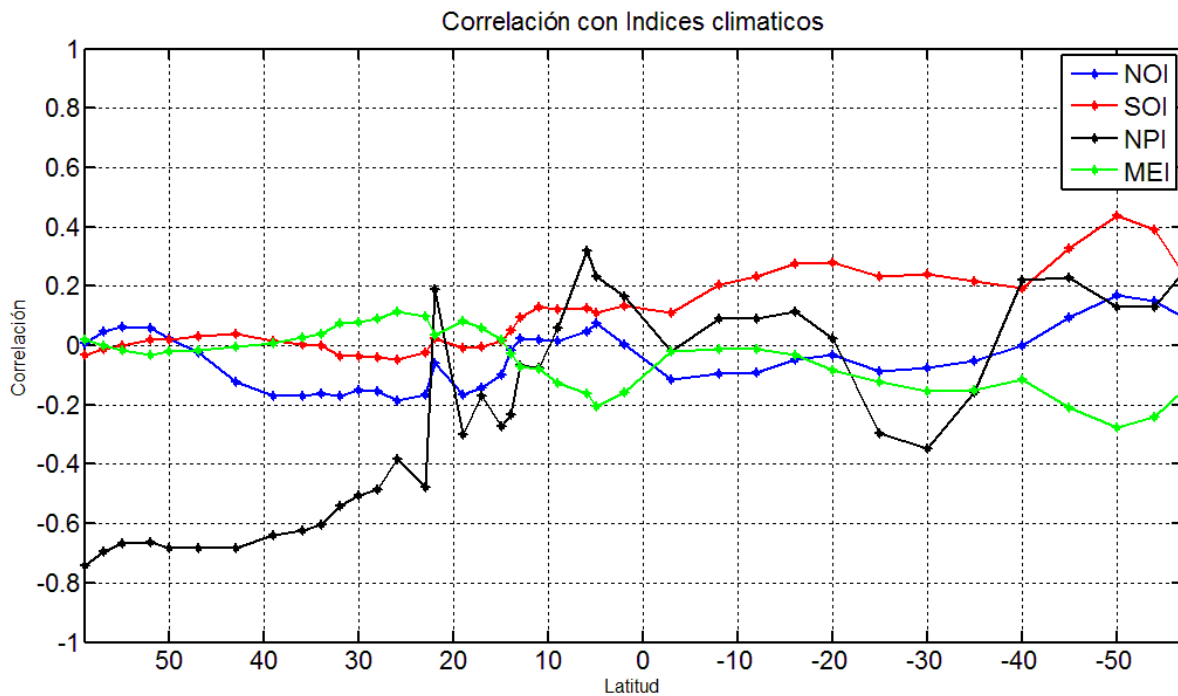


Figura 6.12. Valores de correlación de los índices climáticos con H_{sp} respecto a la latitud. La línea azul representa el índice NOI, la línea roja SOI, la línea negra NPI y la línea verde el índice MEI. Correlaciones al 95% de significancia.

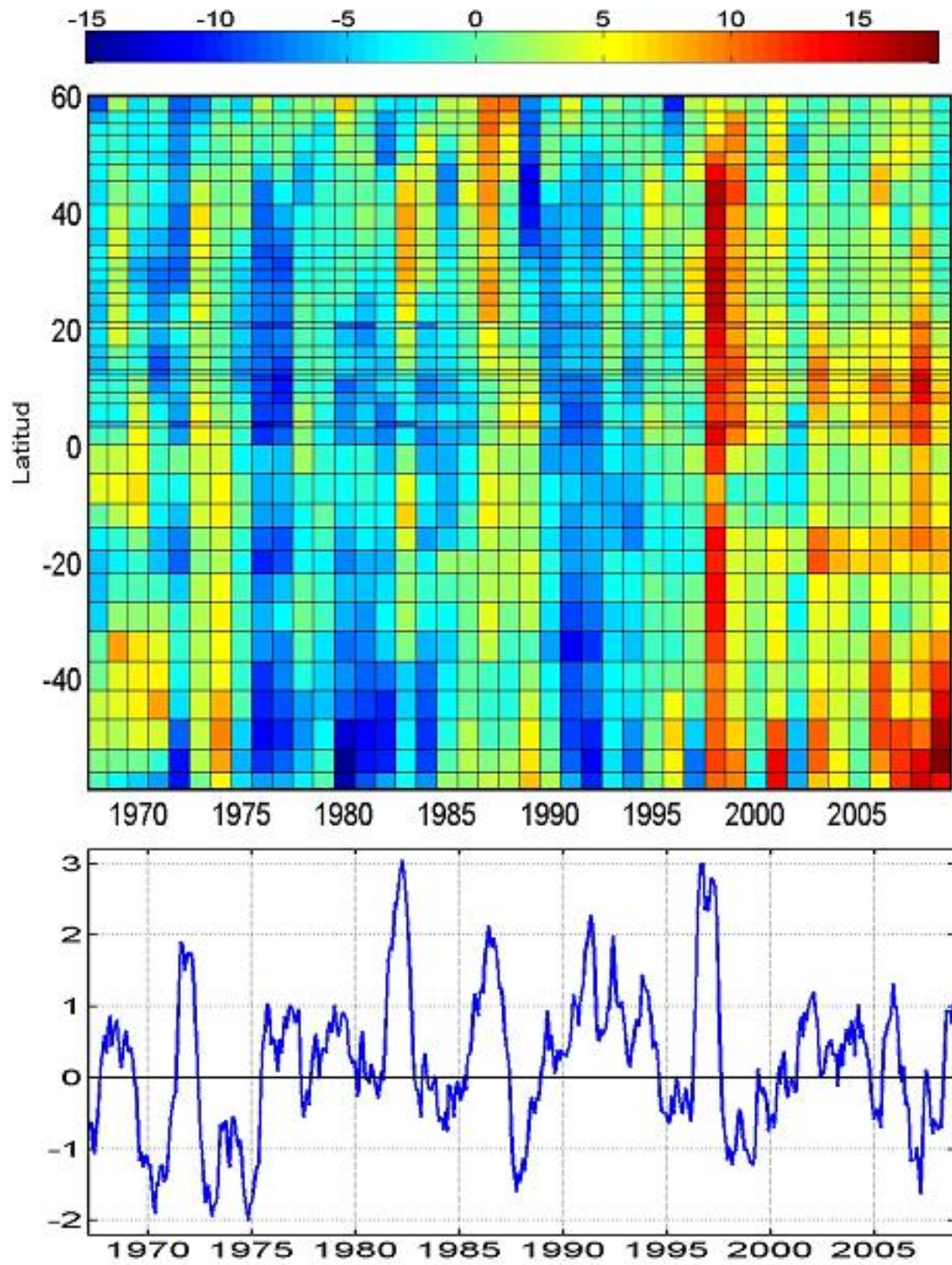
En la figura 6.12 se muestran las correlaciones obtenidas entre los índices climáticos y H_{sp} que tuvieron más del 95% de significancia. Las correlaciones más altas se obtuvieron con el índice del Pacífico Norte con valores mayores a ± 0.5 en el hemisferio norte a partir de los 25° en latitud. En el hemisferio sur tuvo correlaciones importantes en latitudes mayores que 20° con una correlación alrededor de ± 0.2 . El índice SOI fue el segundo mejor correlacionado, pero sólo en el hemisferio sur, con un valor máximo de 0.4 y en general con valores de ± 0.2 . El índice NOI resultó con correlaciones cercanas a ± 0.2 entre las latitudes 20° y 40° N y en el sur a latitudes mayores que 40° . El índice MEI resultó con correlaciones pequeñas en la mayoría de las latitudes, con un valor máximo de -0.25 en el hemisferio sur. Este índice relacionado con los eventos El Niño y La Niña posee en general valores de correlación muy pequeños, sin embargo son significativos, y como se observa en los siguientes diagramas de Hoffmüller influyen en la altura del oleaje.

En las figuras 6.13, 6.14 y 6.15 se representa la anomalía porcentual de H_{sp} , H_{storm} y H_{max} respectivamente. En la gráfica superior los colores representan la diferencia en porcentaje, entre el valor de cada año y el valor promedio total de la serie a cada latitud. En la figura inferior se representan los valores del índice MEI, con el fin de relacionar eventos ENSO a las anomalías observadas en las gráficas.

En la figura 6.13 se pueden observar líneas de anomalía positiva y en la mayor parte del océano en los años 1973-1974, 1988, 1998-1999 y 2009, existen también años en los que sólo alguna zona posee valores con anomalías positivas como los años 2001, 2003, 2007 y 2008. Pueden observarse anomalías negativas durante los años 1972, 1976-1977, 1982-1983 y en 1993. Algunas anomalías sólo destacan en uno de los hemisferios y a latitudes altas. Las anomalías más grandes se observaron en el año 1998 en el hemisferio norte con valores de +15%, y los valores más pequeños de -15% fueron registrados en 1980 en el hemisferio sur.

En la siguiente figura (6.14) se muestran las anomalías de los eventos extremos y se pueden distinguir mejor los años sobresalientes. Anomalías positivas se observan en 1974, 1989, 1998-199, 2003 y del 2006 al 2009 en el hemisferio sur, mientras que los años 1983-1984, 1987 y 1998-199 se observan en el hemisferio norte. Los valores negativos sobresalientes son en los años 1980- 1981 y 1991-1992 en el hemisferio sur; y 1989 en el norte. Estos valores de anomalía en los eventos extremos llegan a ser superiores al 20% lo que puede indicar un aumento en la intensidad de las tormentas durante esos años.

Al igual que en las figuras anteriores, la gráfica 6.15 representa la anomalía porcentual, en este caso de los valores máximos. Los años que resaltan son: con anomalías positivas en una gran zona, los años 1973, 1983, 1998, 2003 y 2009; los valores negativos se observan en los años 1976-1977, 1981-1982 y 1991-1994. En estos valores es importante recalcar que las anomalías positivas en el año 1983 y 2009 poseen valores de hasta el 60%. En esta gráfica es más difícil de identificar y definir los años con valores negativos por la gran diferencia entre los valores máximos y mínimos.



cFigura 6.13. Anomalía porcentual de H_{sp} con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.

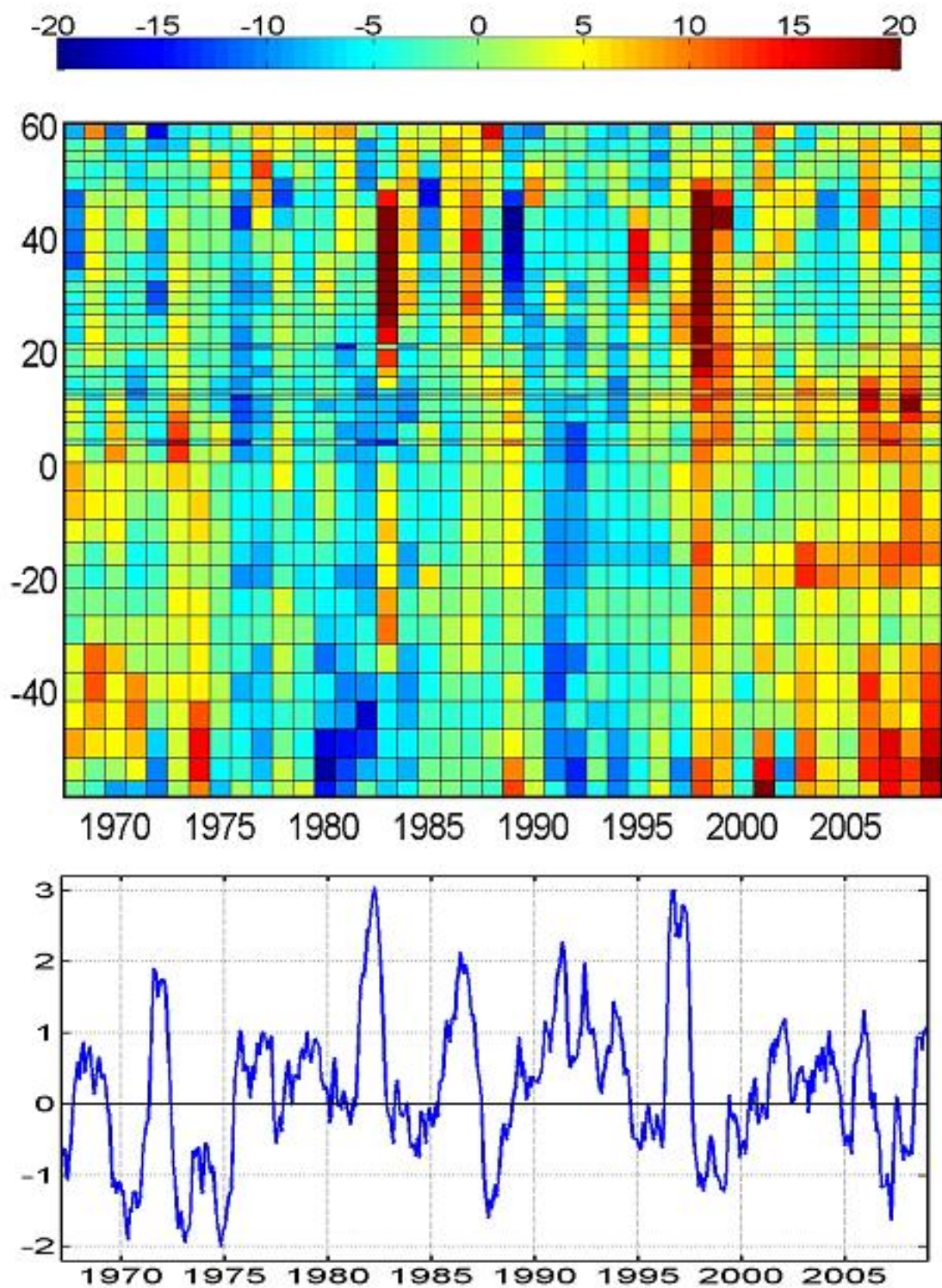


Figura 6.14 Anomalia porcentual de la altura de oleaje extremo con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.

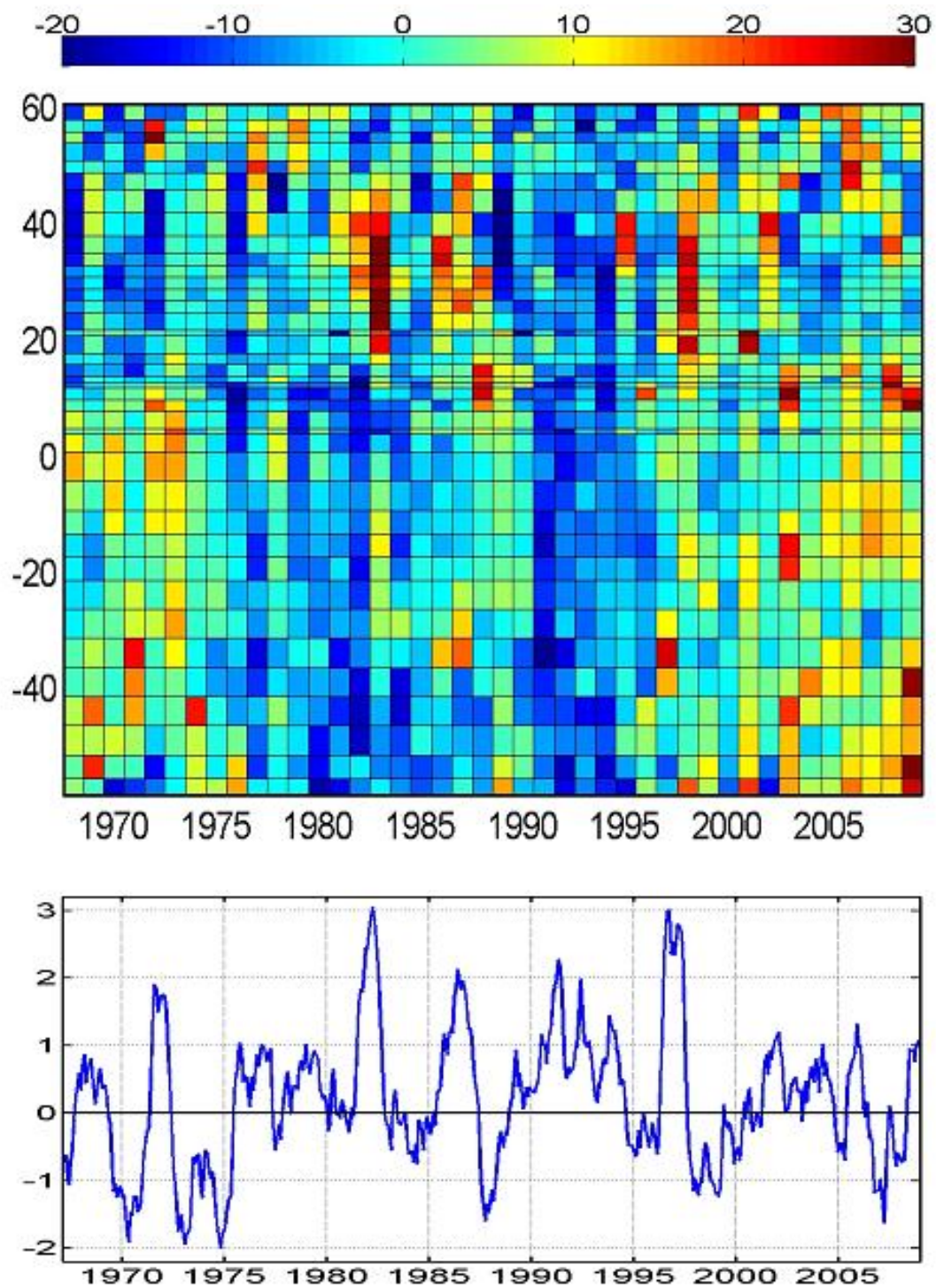


Figura 6.15. Anomalía porcentual de la altura de oleaje máxima con respecto a la latitud. La figura inferior representa los valores del índice MEI para el mismo periodo de estudio.

6.5 Periodogramas.

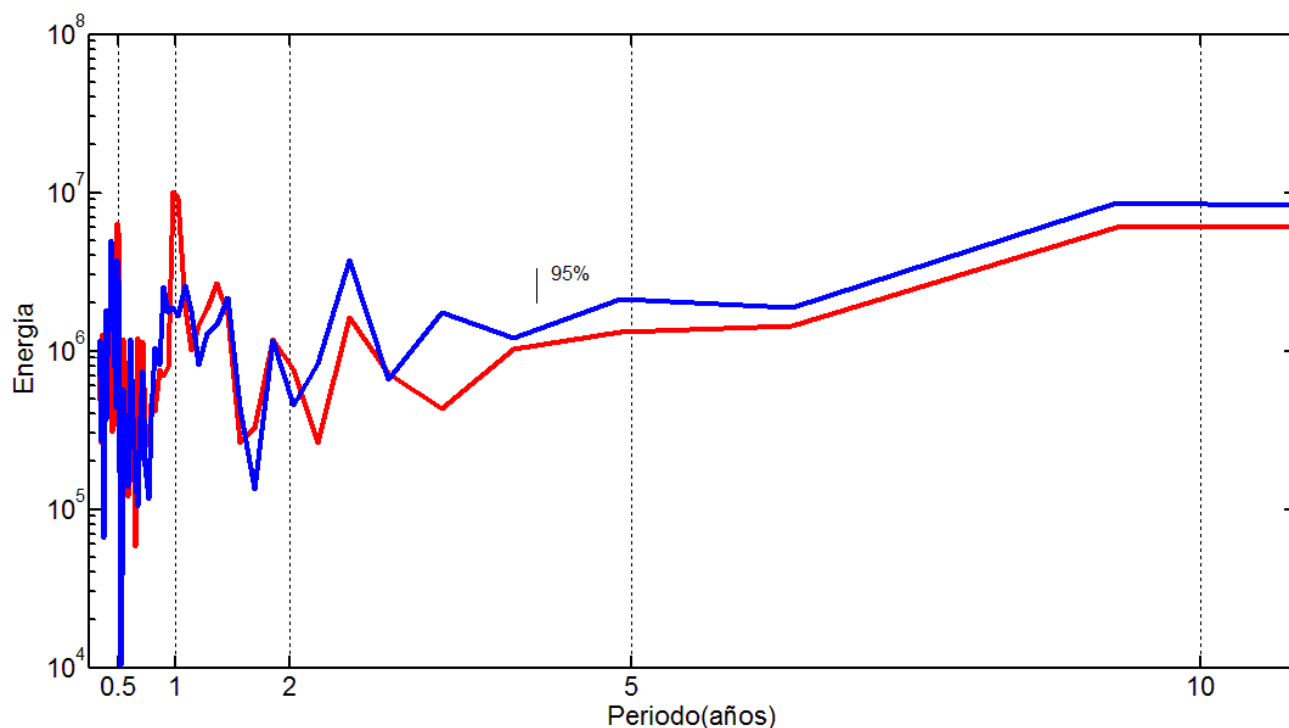


Figura 6.16. Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones del hemisferio sur. La barra indica el intervalo de confianza del 95%.

La figura 6.16 representa el espectro de frecuencias o periodograma, calculado para dos estaciones en el hemisferio sur a -57° y -54° . Con este tipo de diagramas se observan los ciclos más energéticos de una serie de tiempo. En estas dos estaciones en el hemisferio sur, sobresalen en energía los períodos o señales anual y semianual. También se observan, aunque con menor energía, las señales en los periodos de 3.3, 2.5, 1.8 y 1.4 años en ambas series. Las señales menores a un año, encontradas fueron: 0.8, 0.6, 0.44, 0.38 y 0.34 años. Los demás picos de energía no se consideran significativos.

En la figura 6.17 se representa el periodograma de dos estaciones subtropicales, la estación 7 ubicada a los -30° en latitud y a los 32° norte se ubica la estación 29.

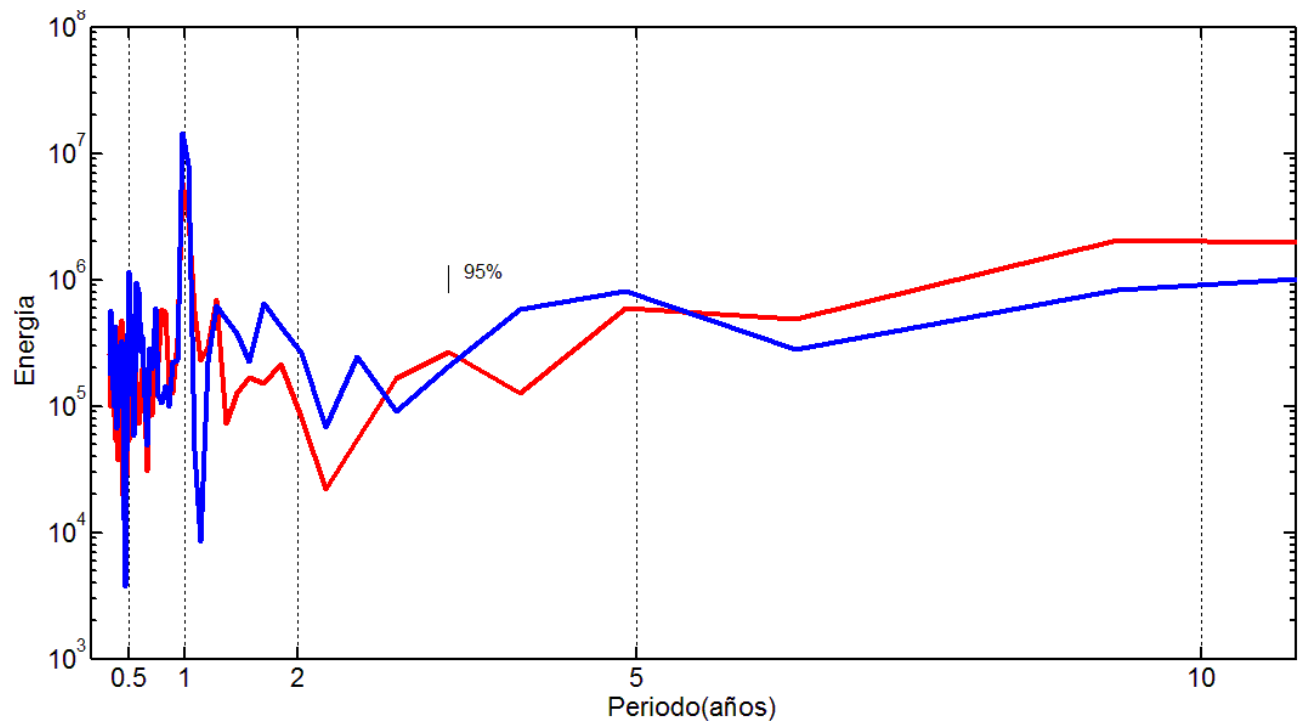


Figura 6.17. Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones en la zona subtropical. La barra indica el intervalo de confianza del 95%. Estación 7 (roja) y estación 29 (azul).

En este periodograma (figura 6.17) la señal anual es muy energética y la que más sobresale. Los ciclos observados con una energía significativa fueron de: 5, 4.2, 1.3, 0.8, 0.6 y 0.44 años.

El periodograma de la figura 6.18 corresponde a dos estaciones cerca del ecuador. En estas series podemos observar que los picos energéticos de las series no coinciden en las bajas frecuencias, excepto en la señal de 1.8 años. En cambio para frecuencias más altas, se observa una gran cantidad de señales significativas, los periodos observados son: 0.7, 0.6, 0.57, 0.5, 0.44, 0.38 y 0.34 años.

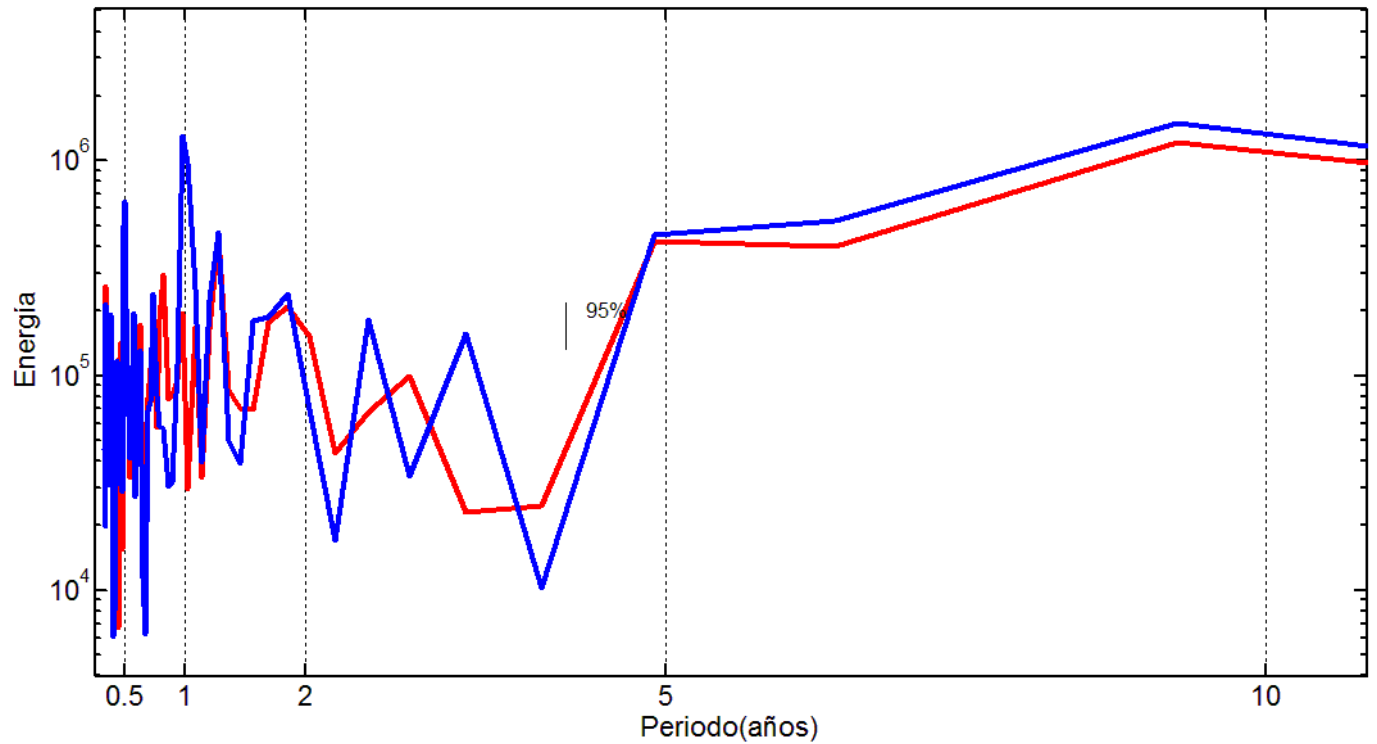


Figura 6.18. Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones cerca del ecuador. La barra indica el intervalo de confianza del 95%.

La gráfica 6.19 representa las señales energéticas de dos estaciones ubicadas en los trópicos, la estación 10 ubicada cerca del Trópico de Capricornio y la estación 22 al sur del Tópico de Cáncer. Estas dos series poseen picos espectrales muy parecidos, tanto en las bajas como en altas frecuencias, aunque la serie de Hs en la estación del norte posee menor energía. Los ciclos identificados en estas zonas fueron: 2.5, 2, 1.8, 1, 0.8, 0.5, 0.44, 0.38 y 0.34 años.

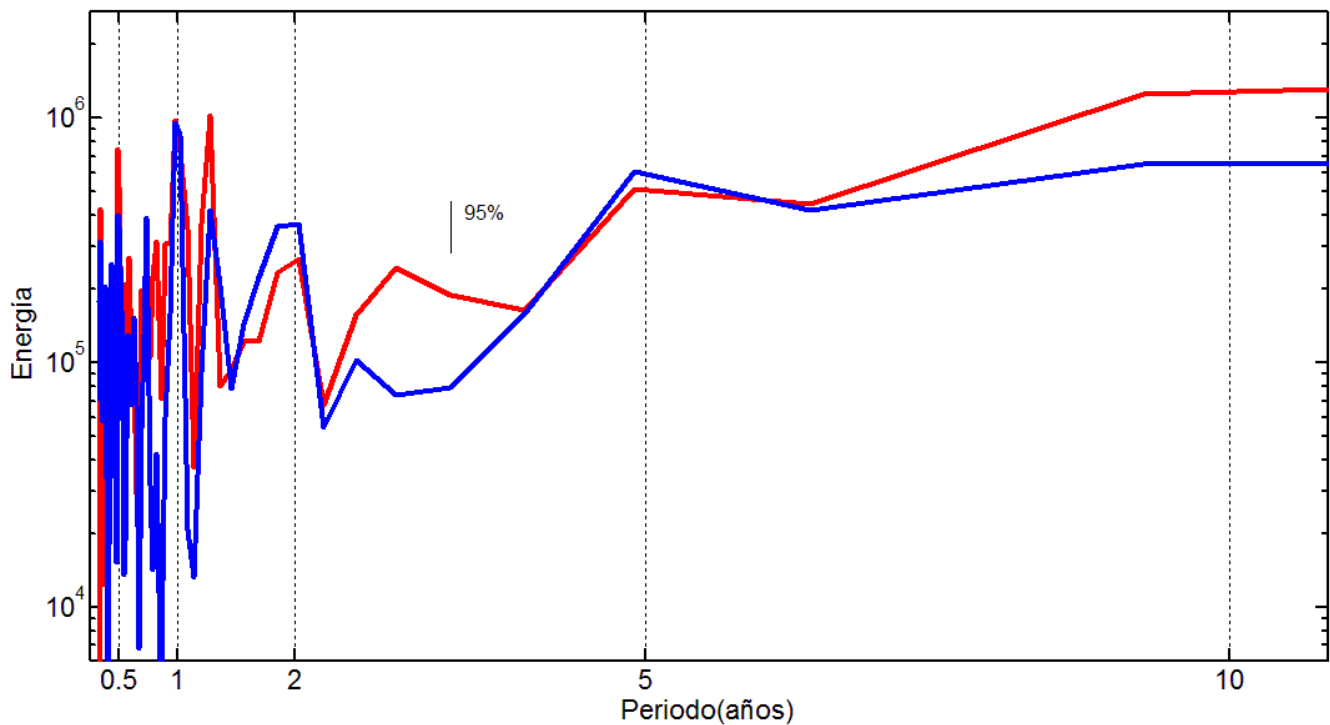


Figura 6.19 Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones ubicadas en los trópicos. La barra indica el intervalo de confianza del 95%. Estación 10 en el Trópico de Capricornio (roja), estación 22 en el Trópico de Cáncer (azul).

En la figura 6.20 se observa el periodograma de las estaciones ubicadas en el hemisferio norte a una latitud mayor que 55° . Estas series de Hs son las más energéticas, y donde los picos espectrales se observan más definidos. En esta zona se observa que la señal anual está muy definida y es notablemente más energética que el resto. Los periodos significativos observados son: 3.34, 2.5, 1.67, 1, 0.64, 0.5, 0.44, 0.38 y 0.34 años.

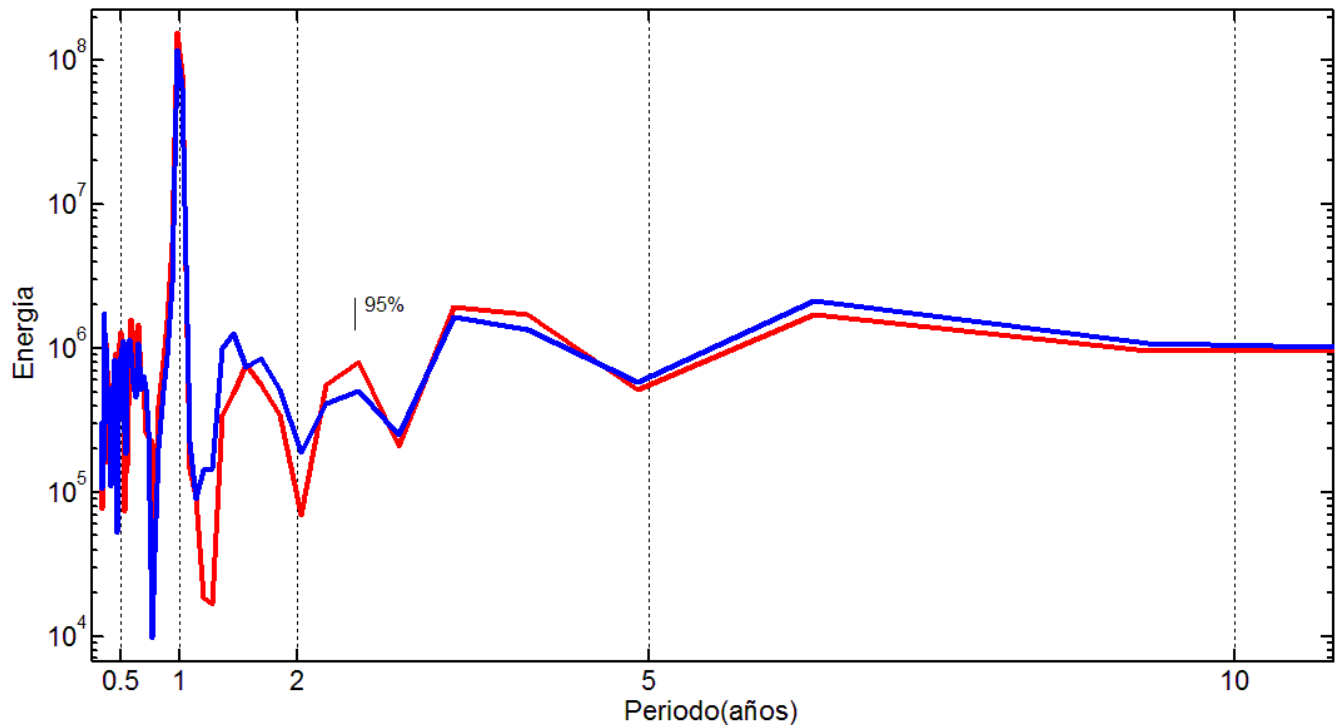


Figura 6.20. Periodograma de la serie de tiempo de Hs en dos estaciones del hemisferio norte. La barra indica el intervalo de confianza del 95%.

7. Discusiones

Las razones de cambio de la altura del oleaje, en los 42 años de estudio se observó que tenían un comportamiento en función de la latitud. Se registro que la altura del oleaje promedio esta aumentando, es decir la serie de H_{sp} en todas las latitudes presentó una razón de cambio positiva. Las tendencias de los eventos extremos también tuvieron valores positivos en su mayoría, sólo un punto cerca del ecuador no represento una tendencia significativa. Las tendencias de los valores máximos fueron más variables, desde pendientes grandes en latitudes altas hasta valores negativos y neutros.

En el hemisferio sur, la razón de cambio de H_{sp} máxima observada fue de 1.2 cm/año, con un mínimo de 0.1 cm/año. El valor máximo para $H_{s_{torm}}$ fue de 1.8 cm/año y el mínimo de 0. La razón de cambio máxima y mínima de $H_{s_{max}}$ fue de

2.6 y -0.3 cm/año respectivamente. Comparando los resultados de este trabajo con la bibliografía encontramos que en el hemisferio sur sólo existe un estudio sobre las tendencias de la altura del oleaje publicado en el 2011 por Young y colaboradores. En este artículo se utilizaron datos de altimetría para todo el mundo, con una resolución de $2^\circ \times 2^\circ$ y un periodo de estudio de 23 años (1985-2008). Ellos reportan sus resultados en porcentaje, indicando para el hemisferio sur tendencias de $\pm 0.25\%$ anual en la altura de ola promedio, para el percentil 95 ellos reportan tendencias entre 0 y 0.5% de aumento; y para el percentil 99 tendencias de hasta el 1% de crecimiento anual. No se puede comparar cuantitativamente las tendencias, pero si el comportamiento, y se observa que tanto en este trabajo como en la bibliografía, las tendencias de $H_{s_{\text{form}}}$ y $H_{s_{\text{max}}}$ son mayores que las razones de cambio de H_{s_p} , en latitudes mayores que 40° . También se advierte que las razones de cambio más pequeñas se observan cerca del ecuador.

En el hemisferio norte el valor máximo de la razón de cambio H_{s_p} observado en este trabajo fue de 0.6 cm/año en un sitio ubicado a los 15° N , en este mismo sitio se presentó la razón de aumento más grande de $H_{s_{\text{max}}}$ con una pendiente de 1.2 cm/año y hacia el norte se registró la tendencia más grande de los $H_{s_{\text{form}}}$ con un valor de 0.9 cm/año. Para el hemisferio norte existen referencias de estudios realizados desde el año 2000, principalmente para latitudes mayores a 30° . Si comparamos las tendencias encontradas por otros autores con las observadas en este trabajo, se advierte que son mucho menores.

Allan y Komar en el 2000 reportaron una pendiente máxima de 0.027 m/año en la serie de altura de ola promedio a una latitud mayor a 40° ; y una pendiente de 0.042 m/año en la altura del oleaje durante el invierno. La fuente de datos fueron 9 boyas del NDBC y la serie de tiempo de este estudio fue de 1972 a 1999 aunque algunos años no fueron incluidos en el cálculo de la tendencia. Es importante recalcar del estudio de Allan y Komar (2000) que se encontraron tendencias negativas en las boyas cercanas a California, con un valor de -0.004 m/año. Para esta misma zona Graham y Díaz reportaron en el 2001 una tendencia de los eventos extremos de 0.025 m/año, esta pendiente se parece más a las

tendencias encontradas en este trabajo, sin embargo los valores siguen siendo superiores. Graham y Díaz realizaron el estudio de diferentes variables con el fin de encontrar tendencias en la intensidad de las tormentas, los datos de oleaje se obtuvieron de una simulación numérica en el periodo de 1948 a 1998.

En 2001 Wang y Swail, publican un estudio realizado con mediciones de ICOADS en el hemisferio norte a latitudes mayores a 30° tanto en el Océano Atlántico como en el Pacífico. Su estudio abarca el periodo de 1958 a 1997 y utilizan el percentil 90 de la altura de ola. Para la zona del Pacífico Este, reportan tendencias de 0.01% anual en California y Alaska, para latitudes medias reportan un máximo de aumento de 0.04% anual.

Gower en el 2002 realiza un trabajo con los datos de 26 boyas en el Pacífico oeste en un período de 1972 a 1999. Gower reporta una tendencia máxima de 0.024 m/año en las boyas fuera de la costa, un valor muy parecido al de Graham y Díaz, sin embargo ellos encontraron tendencias negativas en los datos de boyas cercanas a la costa con valores hasta de -0.024 m/año.

Ruggiero y colaboradores (2010) reportan una tendencia de altura de ola promedio de 0.015 m/año, una pendiente de 0.023 m/año en el invierno y 0.071 m/año en el promedio de las cinco alturas de ola mayores. Ellos utilizaron la serie de tiempo de una boya del NDBC en el periodo de 1976 al 2007. Esta boya es la misma reportada por Allan y Komar en el 2000.

En el estudio de Young y colaboradores (2011) para el hemisferio norte se reportan tendencias negativas en la zona cercana a los trópicos con valores entre 0.0 y -0.5% anual, esto para las alturas promedio, para latitudes mayores a 30° se encuentran tendencias entre 0 y 0.5% anual. Para los valores del percentil 90 existen tendencias de hasta el 1.0% anual en puntos específicos, como el Golfo de Tehuantepec. En el percentil 90 el comportamiento de las tendencias es parecido al encontrado en este trabajo, con pendientes negativas en el ecuador y los valores más altos en latitudes altas y principalmente en el hemisferio sur. El percentil 99 reporta pendientes entre 0.5% y 1% anual en latitudes mayores a 20° , la zona menor a 20° tanto en el norte como en el sur posee pendientes positivas también pero entre 0 y 0.25% anual, excepto la zona del Golfo de Tehuantepec y de

Panamá donde se observan pendientes entre 0.25% y 0.75% anual.

Al mencionar estos artículos es importante recalcar el periodo de estudio para el cálculo de las tendencias, ya que según lo observado estos valores cambian según el periodo total. Por ejemplo Allan y Komar (2000) y Ruggiero y colaboradores (2010) utilizan los datos de la misma boya (46005) de la NDBC, los primeros autores analizan la tendencia de un periodo de 22 años y obtienen un valor de 0.027 m/año en la altura promedio y 0.047 m/año para el invierno, mientras que el segundo estudio incluye 31 años de datos (1976-2007) para el cálculo de la tendencia y obtiene valores de 0.015 m/año en el promedio y 0.023m/año en invierno.

Analizando el comportamiento latitudinal de las tendencias se señalo que las razones de cambio del oleaje extremo y máximo son mayores que las del promedio en la mayoría de las estaciones, indicando que esto se refiere a las zonas en latitudes altas y cerca de los trópicos. En la zona cercana a los trópicos es donde ocurren y se generan las tormentas comúnmente conocidas como ciclones, observar una tendencia de aumento del oleaje extremo puede indicarnos que la intensidad de estas tormentas esta aumentando, esto es importante ya que puede ocurrir que el ciclón no llegue a al costa y la afecte, sin embargo el oleaje si arribara a las playas y debido a su altura dañar la zona costera. Esto puede ocurrir también en latitudes altas donde se genera una gran cantidad de tormentas, y principalmente en el hemisferio sur donde las tendencias de aumento son superiores a la de otras latitudes. En esta zona podemos decir que a parte de la intensidad de las tormentas también podría estar aumentando la cantidad de eventos, ya que las tendencias promedio también son altas. En el hemisferio norte las tendencias son menores, pero es importante recalcar que la altura de oleaje en promedio es mayor a la del hemisferio sur por lo que un aumento aunque sea menor, puede tener mayores consecuencias en la costa.

Sobre las tendencias estacionales, en las figuras 6.8, 6.9 y 6.10 observamos que las tendencias en general son mayores durante la estación de otoño tanto para el oleaje promedio, eventos extremos y valores máximos. Allan y Komar (2000) y Ruggiero y colaboradores (2010) analizan las tendencias de la

estación de invierno asumiendo que serán las mayores, por ser la época de tormentas en el hemisferio norte. En el primer estudio encuentran que estas pendientes si son mayores en las estaciones ubicadas entre 35° y 50° con una diferencia de hasta 0.015m/año, pero para las estaciones ubicadas fuera de estas latitudes las tendencias del promedio son mayores o iguales a las del invierno. Ruggiero y colaboradores reportan una tendencia en el invierno 0.4 cm/año mayor a la del promedio. En este trabajo en la figura 6.11 se comparan las tendencias de las estaciones de verano e invierno y del promedio, donde se observa un comportamiento parecido. Las tendencias del invierno son mayores a las del promedio en latitudes entre los 40° y 50° N y entre los 0° y 17°N son mayores las del invierno que las otras, fuera de estas latitudes las tendencias del promedio son superiores a las del invierno y las del verano son las mayores.

En el estudio realizado por Wang y Swail en 2001 incluyen el análisis de las cuatro estaciones y reportan un aumento total en el periodo del 10% en invierno, para la primavera hasta un 20%, en el verano existen aumentos desde el 5% hasta el 20% y en el otoño entre 5-10% en las alturas de ola del percentil 90. Para el percentil 99 la estación de invierno se mantiene en un aumento del 10% mientras que la primavera aumenta hasta un 30%.

En la figura 6.12 se muestra la correlación de las series promedio con los índices climáticos. Los índices NPI y NOI tuvieron una correlación en fase a la serie de Hs, mientras que el índice SOI tuvo un desfase de un mes y el índice MEI de dos meses.

El índice con mayor correlación fue el NPI en el hemisferio norte, indicándonos que la variabilidad ocurrida en estas latitudes puede explicarse en su mayoría con las oscilaciones de los centros de presión de esta zona. Este índice fue creado casi exclusivamente para Estados Unidos, e incluye las variaciones cíclicas ocurridas en esta zona desde 1950, por lo que abarca eventos El Niño y La Niña así como otros eventos periódicos, pero principalmente los interanuales.

Con respecto a los otros índices podemos decir que representan poco a la serie de la altura del oleaje, sin embargo son significativas, por lo que se pueden explicar algunas de las variaciones y anomalías que se muestran en las figuras

6.13-6.15. Los índices NOI y SOI se enfocan directamente en las variaciones temporales de las diferentes presiones entre la zona tropical y la intertropical, y en estas variaciones se puede observar el llamado fenómeno ENSO, por lo que los ggggconsideraos buenos indicadores de estos eventos.

Comparando los resultados de este trabajo con los de la bibliografía tenemos poca información. Allan y Komar (2000) comparan sus series de tiempo con los índices MEI y el antecedente del NPI, el Índice del Pacífico Este (EP). Las correlaciones encontradas por estos autores se encuentran entre 0.23 y 0.68 para el EP y de 0.18 a 0.59 con el MEI. Con respecto a los resultados presentados en esta tesis observamos que los del índice EP se parecen bastante con valores muy representativos mientras que para el índice MEI sus valores son superiores a los encontrados para el hemisferio norte.

Otro artículo reportando sus valores de correlación entre los índices y al altura del oleaje es Hemer y colaboradores (2010) ellos comparan los índices SOI y el Índice del Modo Anular del Sur (SAMI) con el promedio de la altura del oleaje estacional y reportan correlaciones con valores entre -0.09 y -0.23 con un valor máximo de 0.4 durante el verano, esto para el índice SOI. Para el índice SAMI las correlaciones van desde 0.05 hasta 0.28 tanto negativas como positivas y tres valores notables de 0.58, 0.54 y 0.78 también durante el verano.

En las figuras 6.13 a 6.15 observamos que los valores destacados de anomalías coinciden con años en los que ocurrieron eventos El Niño y La Niña importantes. Sin embargo no se distingue una relación directa, por ejemplo las anomalías negativas registradas en los años de 1976-1977 y 1991-1992 ocurren en condiciones de un evento fuerte de El Niño, pero también las anomalías positivas de los años 1983, 1998, 2009 representan eventos fuerte de El Niño.

Allan y Komar (2000) relacionan el índice MEI con la cantidad de tormentas ocurridas en el año. En latitudes altas encuentran una correlación significativa, sin embargo en las boyas cerca de California mantienen una relación directa con la cantidad de tormentas. En cuanto a los valores promedio de altura del oleaje ellos reportaron casos parecidos al de este trabajo, en el evento La Niña de 1998-1999 observan olas de gran altura, mientras que en el evento fuerte de 1988-1989

también La Niña produjo alturas del oleaje pequeñas.

Gower (2002) analizó los eventos de El Niño de 1982-1983 y 1997-1998, sólo se evaluaron 9 de las 26 boyas y encontró un cambio positivo en la altura del oleaje de hasta 0.66 m en el primer evento y 1.18 m en el segundo. En general observó cambios positivos en la altura de ola, exceptuando dos boyas, donde se encontraron los mismos efectos contrarios, disminución de la altura de ola en 1982-83 y un aumento en el evento de 1997-98.

Allan y Komar asocian esta diferencia de resultados a la poca influencia de la Oscilación del Sur en latitudes altas del hemisferio Norte, mientras que Gower lo atribuye a la diferencia de duración de los periodos de influencia de estos eventos.

En general en los diagramas de Hofmüller (figuras 6.13-6.15) podemos relacionar estas anomalías grandes ya sean positivas o negativas en la altura de ola a los eventos de El Niño y La Niña, afirmando que estos eventos influyen al oleaje y en mayor medida a los eventos extremos, un claro ejemplo de esto serían los años 1983 y 1998 que según la bibliografía han sido los dos eventos de El Niño más importantes registrados, y donde se encontraron olas hasta un 60% más grande

8. Conclusiones

Utilizando una simulación numérica implementada en el Océano Pacífico por 42 años con el modelo WAM ciclo 4.5 se pudo obtener una serie de tiempo suficientemente larga para generar una climatología de la altura del oleaje a lo largo de la costa del continente Americano.

Las series obtenidas permitieron obtener la razón de cambio de la altura del oleaje respecto al tiempo e identificar el comportamiento de estas latitudinalmente.

La razón de cambio fue mayor en $H_{s_{\text{torm}}}$ y $H_{s_{\text{max}}}$ que en H_{s_p} en latitudes

altas y en la zona tropical. Lo contrario ocurre en la zona intertropical y subtropical con tendencias de la altura promedio mayores a los eventos extremos y máximos. Los mayores valores de las tendencias se presentaron en puntos ubicados al sur de Chile.

Las razones de cambio de Hs son mayores en el otoño y las menores son durante la primavera. La razón de cambio del verano es mayor que la del promedio anual, en casi todas las latitudes excepto entre los 0° y 20° N.

El índice NPI explica en gran medida la variabilidad de la altura del oleaje en el hemisferio norte. Los índices NOI, MEI y SOI no poseen una gran correlación pero son significativos en las variaciones de la altura del oleaje.

Aunque la relación entre el fenómeno ENSO y las variaciones de la altura del oleaje aun no es clara, se puede afirmar que estos eventos afectan de manera positiva o negativa en la altura del oleaje y principalmente en los eventos extremos.

APÉNDICE A

Detalles de la simulación numérica de oleaje implementada en el Océano Pacífico con el modelo WAM Ciclo 4.5 como parte de las actividades del proyecto pe-oleajePBC.

A) Intervalos de integración y periodo de simulación.

El modelo WAM posee dos pasos temporales de integración; uno correspondiente a la advección de energía y otro correspondiente a la integración de los términos fuente. En esta implementación, ambos pasos en tiempo son definidos como 20 minutos. La simulación numérica comprende un período de 42 años, entre enero de 1968 hasta diciembre de 2009.

B) Batimetría.

La batimetría utilizada fue extraída de la base ETOPO2v2, cuya resolución espacial es de 2 minutos en latitud y longitud. Los datos extraídos abarcan la región entre -80° y 80° en latitud y -260° y -60° en longitud, con una resolución igual a la original. Para la presente implementación, los detalles batimétricos no son considerados para la propagación del oleaje, y ésta se considera como en aguas profundas en todo el dominio (es decir, no se considera refracción con el fondo). La batimetría solo se utiliza para definir los márgenes divisorios entre mar y tierra.

Fuente de los datos de batimetría:

<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>

C) Viento.

El forzamiento atmosférico está representado por las componentes del viento a 10 metros sobre el nivel del mar, extraídos de la base de datos de superficie de Re-análisis NCEP/NCAR.

La resolución temporal original de la base de datos es de 6 horas, con una resolución espacial variable en latitud, la cual fue interpolada a una malla con

resolución espacial regular de 1 grado. Se prepararon los datos correspondientes al período 1968–2009 para ser usados como forzamiento en el modelo numérico de oleaje.

Fuente de los datos de viento:

ftp://ftp.cdc.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis/surface_gauss/

D) Resolución espectral.

En esta implementación, el espectro direccional está discretizado de la siguiente manera:

40 frecuencias: desde 0.026Hz hasta 1.07Hz, con una distribución logarítmica, y 36 direcciones, lo cual representa una resolución direccional de 10 grados.

E) Dominio numérico.

La malla numérica cubre el siguiente dominio geográfico: -72° a 68° en latitud y -240° a -60° en longitud, con una resolución espacial regular de 1° . Esta región contiene áreas consideradas como de efecto nulo en la generación del oleaje incidente en el Pacífico mexicano, por lo cual se decidió enmascararlas (es decir, se definen como tierra). Las áreas enmascaradas se muestran en la Tabla III.

Tabla III. Áreas enmascaradas en WAM ciclo 4.5.

Área	Latitud (grados)	Longitud (grados) de 0 a 360°
Bahía Hudson y Golfo de México.	18 a 68	262 a 300
Mar Caribe (01).	14 a 18	271 a 300
Mar Caribe (02).	08 a 14	276 a 300
Mar de Arafura (Norte de Australia).	-20 a -07	120 a 146
Oeste de Nueva Guinea.	-07 a 01	120 a 138
Mindanao.	05 a 12	120 a 125
Sur del Mar de Japón.	32 a 39	120 a 139
Norte del Mar de Japón.	39 a 52	120 a 142

1. Referencias

Allan J.C. y P.D. Komar. 2000. Are ocean wave heights increasing in the Eastern North Pacific?. Eos Trans. AGU 81. 561-566

Bacon S. and D. J. Carter. 1991. Wave climate changes in the north Atlantic and the north sea. Int. J. Climatol 11, 543-558

Burroughs W.J. 2001. Climate Change: A multidisciplinary approach. Cambridge University Press USA. 298 pp

Cavaleri L. y M. Sclavo. 1998. Characteristics of quadrant and octant advection schemes in wave models. Coastal Engineering. Vol 34. 221-242

Emery William J. y R. E. Thomson. 2004. Data analysis methods in Physical Oceanography. Elsevier. Amsterdam, Netherlands. 638 pp

Graham N. y H. Díaz. 2001. Evidence for intensification of North Pacific Winter Cyclones since 1948. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol 82, No 9.

Gower J.F.R 2002 Temperature, Wind and Wave Climatologies and Trends from Marine Meteorological buoys in the Northeast Pacific. Vol. 15, 3709-3716

Gulev. S. y V. Grigorieva. 2004. Last century changes in ocean wind wave height from global visual wave data. Geophysical Research Letters. Vol 31. L24302

Günther H., Hasselmann y P.A.E.M Janssen., 1992. The WAM Model Cycle 4 (revised version) Tech Rep. No4, Hamburg, Deutsches Klimatisches Rechenzentrum

Günther H., 2006. WAM Cycle 4.5 Institute for Coastal Research, GKSS Research Centre Geesthacht, Germany

Hemer M.A., J. Church, J. R. Hunter 2010, Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. Int J. Climatol. Vol 30: 475-491

Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M. 1996. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University press. Great Britain. 532 pp.

Kalnay E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin , M. Iredell, S. Saha, G. White, j. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne y D. Joseph 1996 the NCEP/NCAR 40- year reanalysis project. Bull. Amer. Meteor. Soc Vol 77 437-471

Khandekar M.L. 1989, Operational analysis and prediction of ocean wind waves. Springer- Verlag, Germany. 214 pp

Knauss, J. A., 1996. Introduction to physical oceanography. 2nd ed., Prentice Hall, New Jersey, 309 pp.

Lizano O., Ocampo F. Alvarado L., Vega R., Puig J.M. 2001. Evaluación de los modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México. Revista Tópicos de Meteorología y Oceanografía. Vol 8.

Ruggiero P., P. Komar y J. Allan. 2010. Increasing wave heights and extreme values projections: The wave climate of the U.S. Pacific Northwest. Coastal Engineering. Vol 57. 539-552.

Schwing F.B., Muphree T., Witt L. Green P.M. 2002 The evolution of oceanic and atmospheric anomalies in the northeast Pacific during the El Niño and La Niña events of 1995-2001. Progress in Oceanography. DTDv4.3.1/ PROOCE358P

Schwing F.B., Muphree T., Green P.M. 2002 The Northern Oscillation Index (NOI): A new climate index for the northeast Pacific. Progress in Oceanography DTD v4.3.1/ PROOCE321P

Wang X. L. y Swail V. R. 2001 Changes of extreme wave heights in the Northern Hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. Journal of Climate. Vol 14. 2204-2221.

Wolter K. y Timlin M. S. 2011 El Niño/ Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). Int. J. Climatol. 31: 1074-1087

Young I.R., S. Zieger, A. V. Babanin 2011 Global Trends in Wind Speed and Wave Height. Science 332, 451 DOI: 10.1126/science.1197219