

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE
FRENTE A LA COSTA DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

PAOLO TITO ESTRADA MARROQUÍN

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN FÍSICA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR
JUNIO DE 2011

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA
ESCUELA DE FÍSICA



Universidad de El Salvador

Hacia la libertad por la cultura

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL OLEAJE
FRENTE A LA COSTA DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:
PAOLO TITO ESTRADA MARROQUÍN

ASESORES:

M. SC. DAVID ENOC ESCOBAR

M. SC. FRANCISCO GAVIDIA MEDINA

CIUDAD UNIVERSITARIA, SAN SALVADOR
JUNIO DE 2011

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

M. SC. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ
RECTOR

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ
SECRETARIO GENERAL

PHD. RAFAEL ANTONIO GÓMEZ ESCOTO
DECANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

LIC. MARÍA TRINIDAD TRIGUEROS DE CASTRO
SECRETARIO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

M. SC. VÍCTOR LAUREANO CORTEZ LARA
DIRECTOR ESCUELA DE FÍSICA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

Agradecimientos

A Dios Todopoderoso por ser mi guía y permitirme culminar mi carrera con éxito.

A mi familia por su apoyo incondicional.

A los asesores por su apoyo y soporte en el desarrollo de la presente investigación, por estar siempre pendientes en el desarrollo óptimo y efectivo de la investigación.

Al Dr. Francisco Ocampo Torres por ser quien me motivó a desarrollar este trabajo de investigación en la línea de la física del oleaje y su apoyo a pesar de la distancia, pero la comunicación y el apoyo siempre está presente de manera incondicional y desinteresada.

A Humberto Sermeño por su apoyo en el dominio de Linux.

Resumen

El Servicio Oceanográfico Nacional analiza los parámetros del oleaje provenientes del modelo numérico de olas Wavewatch III, usado ampliamente por la NOAA de los Estados Unidos, con el objeto de pronosticar por cada semana las condiciones marítimas de oleaje cercanas a la costa salvadoreña. En este Trabajo de Graduación se hizo posible la implementación de un modelo numérico para determinar la climatología del oleaje para la costa salvadoreña, empleando datos de viento de re-análisis y provenientes del modelo de predicción GFS. Se modeló el clima del oleaje empleando dicho modelo numérico para un período de tiempo aproximado de catorce años alimentado con mediciones de viento de barcos, estaciones meteorológicas y modelos de predicción de viento a una altura de diez metros. El primer nodo ubicado en las coordenadas geográficas 90W,13N por tener una profundidad de 1189 metros es representativo del oleaje en aguas profundas, mientras que el otro nodo ubicado en 88.75W,13N con una profundidad de 127 metros es representativo de aguas someras. Se calcularon los parámetros altura significativa, periodo y dirección del oleaje (máximos, mínimos, moda y promedio) para ambos nodos. El modelo resuelve la evolución espacial y temporal del espectro de energía de las olas entre los distintos términos de generación y disipación, este espectro de energía contiene la información necesaria para calcular los parámetros estadísticos principales de las olas, de ahí su importancia como salida del modelo numérico. Los parámetros se calcularon a intervalos de 3 horas y la evolución del espectro se analizó a intervalos de 1 hora. Se compararon las salidas del modelo implementado en la estación de trabajo contra las salidas almacenadas en el Servicio Oceanográfico Nacional y se calcularon parámetros estadísticos para las distintas estaciones o épocas del año.

Índice general

Agradecimientos	I
Resumen	III
Índice de Figuras	X
Índice de Cuadros	XI
Introducción	XIII
1. Marco Teórico	1
1.1. Ondas mecánicas	1
1.2. El oleaje	2
1.2.1. Definición	3
1.2.2. Oleaje local o mar local	5
1.2.3. Oleaje distante o mar de leva	5
1.2.4. Olas versus mareas	6
1.2.5. Clasificación	6
1.3. Teoría de Airy de las ondas	8
1.3.1. Ecuaciones gobernantes	9
1.3.2. El perfil de la onda	11
1.3.3. Relación de dispersión	11
1.3.4. Rapidez de fase de la onda	11
1.3.5. Longitud de onda	12
1.3.6. Movimiento de las partículas de agua	12
1.3.7. Trenes de ondas y velocidad de grupo	13
1.3.8. Limitaciones de la teoría lineal	15

1.4.	Ondas y el concepto de un espectro de onda	15
1.4.1.	Espectro direccional	18
1.4.2.	Adquisición de un espectro	18
1.4.3.	Crecimiento limitado por fetch y por duración	19
1.4.4.	El espectro de olas oceánicas	19
1.4.5.	La forma JONSWAP del espectro	20
1.5.	Ecuación de transferencia radiativa	21
1.5.1.	Cinemática	21
1.6.	Términos fuente	22
1.6.1.	Entrada atmosférica, S_{in}	22
1.6.2.	Cuadruplete de interacciones no lineales, S_{nl}	23
1.6.3.	Espuma blanca, S_w	24
1.6.4.	Fricción con el fondo oceánico, S_{bot}	24
1.7.	Pronóstico del oleaje	25
1.7.1.	Variabilidad de los datos de viento	26
1.8.	Wavewatch III	27
1.8.1.	Características del modelo	27
1.8.2.	Características numéricas	28
1.8.3.	Ecuaciones gobernantes	29
1.8.4.	Aproximaciones numéricas	31
1.8.5.	Opciones de salida	32
1.8.6.	Por qué usar Wavewatch III	33
2.	Metodología	37
2.1.	Instalación de Wavewatch III	37
2.1.1.	Consideraciones previas	37
2.1.2.	Procedimiento de instalación	38
2.1.3.	Consideraciones adicionales	42
2.2.	Uso de WW3	43
2.3.	Datos de entrada	45
2.3.1.	Condiciones iniciales	49
2.3.2.	Opciones de salida	50
2.3.3.	Trabajo adicional	51

3. Resultados y Análisis	53
3.1. Características del oleaje	53
4. Climatología del oleaje	63
4.1. Anual	63
4.2. Estacional	73
4.3. Mensual	75
5. Validación de resultados	79
5.1. Histogramas	79
5.2. Correlaciones	79
6. Conclusiones y Recomendaciones	89
6.1. Conclusiones	89
6.2. Recomendaciones	91
Bibliografía	94
A. Anexos	95
A.1. Códigos fuente	95
A.1.1. reanalysis wind.m	95
A.1.2. readgribwindww3.m	99
A.1.3. global	100
A.1.4. globalTp.gs	110
A.1.5. globalWind.gs	113
A.1.6. centroHs.gs	116
A.1.7. fourierhs.m	119
A.1.8. leeww3spc.m	120
A.1.9. readnodosgrib.m	120
A.1.10. unirhistoricosnoaa.m	121
A.1.11. leetabww3.m	124

Índice de figuras

1.1. Esquema de definición que muestra el dominio de solución para la Teoría Lineal de Ondas	4
1.2. Clasificación de las olas según su longitud de onda	4
1.3. Espectros de energía de los diferentes tipos de olas oceánicas.	7
1.4. La formación de grupos de onda como el resultado de la superposición de dos trenes de onda lineales con distintas frecuencias.	14
1.5. Un registro típico de olas medido en el lago George, Australia.	16
1.6. Mapa del Océano Pacífico de altura significativa del oleaje.	34
1.7. Mapa del Océano Atlántico de altura significativa del oleaje.	35
2.1. Representación de la malla global que contiene los datos en formato NetCDF . . .	46
2.2. Visualización del campo de viento en el dominio global	49
3.1. espectro direccional	54
3.2. Espectro direccional del oleaje para la fecha y hora establecida	55
3.3. Espectro unidireccional del oleaje para la fecha y hora establecida	55
3.4. Espectros direccionales del oleaje cada 3 horas.	56
3.5. Variabilidad de la altura significativa del oleaje a partir de datos modelados con WW3 para el año 1997 en el nodo 13N 88.75W	57
3.6. Dirección principal del oleaje modelada con WW3. Nodo 13N 88.75W, año 1997 .	58
3.7. Mapa de altura significativa del oleaje y su dirección (vectores). Océano Pacífico centroamericano	59
3.8. Mapa de período predominante del oleaje y su dirección (vectores). Océano Pacífico centroamericano	60
3.9. Mapa global de período de la componente más energética del oleaje y dirección (vectores)	61
4.1. Serie temporal de altura significativa. Años 1997-2010	65

4.2. Serie temporal de periodo. Años 1997-2010	66
4.3. Serie temporal de dirección. Años 1997-2010	68
4.4. Alturas significativas de oleaje modeladas desde 1997 hasta 2010	69
4.5. Períodos máximos de oleaje modelados desde 1997 hasta 2010	71
4.6. Direcciones máximas de oleaje modeladas desde 1997 hasta 2010	72
5.1. Columna izquierda: Histogramas de altura significativa, período y dirección del oleaje modelados en el nodo 13N 90W. Columna derecha: Histogramas con las salidas almacenadas (históricas) para el mismo nodo.	80
5.2. Columna izquierda: Histogramas de altura significativa, período y dirección del oleaje modelados en el nodo 13N 88.75W. Columna derecha: Histogramas con las salidas almacenadas (históricas) para el mismo nodo.	81
5.3. Validación de Hs con WW3 v2.22 vs operacional usando vientos de Reanálisis (NCEP). Año 1997	82
5.4. Validación de Hs empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	83
5.5. Validación de periodo empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	84
5.6. Validación dirección empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	85
5.7. Validación de Hs empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	86
5.8. Validación de periodo empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	87
5.9. Validación dirección empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010	88

Índice de cuadros

4.1. Estadísticos anuales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 90W.	64
4.2. Estadísticos anuales de Periodo máximo (en segundos) para el nodo 13N 90W.	64
4.3. Estadísticos anuales de Dirección (en grados sexagesimales) del oleaje para el nodo 13N 90W.	67
4.4. Estadísticos anuales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.	67
4.5. Estadísticos anuales de Período (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.	70
4.6. Estadísticos anuales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 88.75W.	70
4.7. Estadísticos estacionales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 90W.	73
4.8. Estadísticos estacionales de Período mas energético (en segundos) para el nodo 13N 90W.	73
4.9. Estadísticos estacionales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 90W.	74
4.10. Estadísticos estacionales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.	74
4.11. Estadísticos estacionales de Período mas energético (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.	75
4.12. Estadísticos estacionales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 88.75W.	75
4.13. Estadísticos mensuales de altura significativa (en metros) nodo 13N 90W.	75
4.14. Estadísticos mensuales de período (en segundos) nodo 13N 90W.	76
4.15. Estadísticos mensuales de dirección (en grados) nodo 13N 90W.	77
4.16. Estadísticos mensuales de altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.	77
4.17. Estadísticos mensuales de período (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.	78
4.18. Estadísticos mensuales de dirección (en grados) para el nodo 13N 88.75W.	78

Introducción

LOS océanos cubren alrededor del setenta por ciento de la superficie de nuestro planeta y gran parte de la actividad humana se desarrolla en las costas de los continentes, El Salvador no es la excepción. Es por ello que se hace necesario un estudio sobre el clima marítimo (oleaje, corrientes, mareas, etc), ya que, la comprensión del mismo contribuye de gran manera a la población que desarrolla las actividades típicas de la costa salvadoreña; por ejemplo, la predicción del clima marítimo es de mucha utilidad para las embarcaciones que realizan pesca durante la navegación; el turismo, diseño de estructuras entre otros. En el presente trabajo se trata acerca del clima del oleaje.

La costa salvadoreña con sus casi 300Km de línea costera es una zona que desempeña un rol importante en el desarrollo de la actividad socio-económica del país, su constante monitoreo debe ser primordial, para poder detectar irregularidades o eventos extremos que pongan en riesgo a la población que habita la zona.

El oleaje no es más que la manifestación o respuesta del agua oceánica a la variación de presión generada por vientos muy fuertes a distancias muy lejanas o localmente en el sitio de interés, que logran crear perturbaciones en la superficie del mar, produciendo ondas mecánicas y trenes de ondas que se propagan como tal en los océanos.

Asimismo es vital conocer el comportamiento típico del oleaje, comúnmente conocido en el lenguaje técnico como climatología del oleaje, que posee muchas aplicaciones, tales como, el diseño de estructuras marítimas (rompeolas, puertos, etc.). Importante además para los surfistas que buscan destinos con condiciones de oleaje propicias para su sano esparcimiento. El turismo, por ejemplo, con la actividad comercial que conlleva, ha sido mencionado como un eje de desarrollo del país en el presente y anteriores gobiernos ya que potencia el desarrollo de la zona costera.

Bajo esa visión del gobierno, surge la creación del Servicio Oceanográfico Nacional (SON) para satisfacer las demandas de información de la población y lo cual ha permitido desarrollar este proyecto; de forma paralela la Universidad de El Salvador se beneficia en el aspecto que proyectos como estos abren las puertas de la investigación en la oceanografía para abrir brecha hacia la

especialización en dicha área, ya que El Salvador no cuenta con centros de educación superior especializados en esa materia.

La descripción del oleaje en una zona determinada, se complementa utilizando modelos numéricos basados en las teorías que describen la física del oleaje, la más comúnmente utilizada en modelos numéricos de oleaje y la que se trata en este trabajo es la Teoría Lineal de las Ondas, pero existen otros que incluyen métodos de perturbación, tratando el problema de forma no-lineal, lo cual es lo deseable, pero incluso usando las simplificaciones de la teoría lineal, la demanda en poder de cómputo es enorme.

El Salvador, siendo un país en vías de desarrollo posee sus limitantes en cuanto a acceso a tecnología, y siendo el área de la Ciencia y la Tecnología relegada a un segundo plano, resulta complicado obtener un cluster para el desarrollo de actividades de investigación como la que nos ocupa en este momento. Aún con esas limitantes, mediante este trabajo se pretende dar respuesta a esa necesidad de país.

El modelo numérico empleado es el Wavewatch III (WW3) que utiliza la teoría lineal en su código fuente, además de otras simplificaciones numéricas, en su versión 2.22. WW3 es utilizado ampliamente en la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, para describir y predecir el oleaje en ese país.

En este estudio la investigación desarrollada tuvo los siguientes objetivos específicos:

- Se obtuvo la variabilidad climática del oleaje durante las distintas estaciones en un período aproximado de 14 años.
- Se implementó un modelo numérico de tercera generación para describir el oleaje.
- Se logró determinar las características estadísticas del oleaje frente a la costa salvadoreña.
- Se desarrolló un estudio que sirva como base para futuras investigaciones en la rama de la oceanografía física.

En el presente trabajo se presenta la metodología, la implementación de un modelo numérico de predicción de olas, como lo es Wavewatch. Se presentan resultados consistentes con las salidas operativas del modelo funcionando en la NOAA. Se utilizaron 14 años de datos de viento para alimentar el modelo, ya que es el viento el generador de olas de gravedad.

Finalmente, este trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera: Introducción, Marco Teórico, Metodología, Resultados (Climatología del oleaje), Validación de Resultados, Conclusiones y Recomendaciones, Bibliografía y Anexos.

Capítulo 1

Marco Teórico

EL capítulo trata sobre la naturaleza del oleaje, que son meramente ondas mecánicas, una breve descripción de éstas, la definición formal del oleaje, tipos de oleaje y cómo se clasifican. La teoría lineal de Airy es la teoría más usada para describir la física de las olas y entenderlas más fácilmente. Se hace una introducción al concepto del espectro de una onda, en este caso ondas mecánicas que se propagan en el medio oceánico. Se describen los términos de generación (acumulación de energía) del oleaje y los términos de disipación (pérdida de energía); así como la importancia del pronóstico del oleaje mediante el uso de modelos numéricos.

1.1. Ondas mecánicas

LAS ondas son un fenómeno natural común e importante. Las ondas de choque, las ondas en el agua, las onda de presión así como las ondas de sonido son ejemplos cotidianos de ondas.

Para describir las ondas es necesario definir sus escalas de espacio y tiempo. En primer lugar se debe tener claro el concepto de onda. Una onda mecánica es una perturbación que viaja a través de algún material o sustancia llamada el medio para la onda. A medida la onda viaja a través del medio, las partículas que componen el medio sufren desplazamientos de varios tipos, dependiendo de la naturaleza de la onda (Sears et al., 2008). Según (Halliday et al., 2001) formalmente, puede definirse las ondas mecánicas como aquellas que viajan de un lugar a otro a través de un medio material, originando una perturbación temporal en este medio, sin que el medio a su vez se transporte de un lugar a otro.

Otro aspecto muy importante que caracteriza a las ondas, es el hecho de que todo movimiento ondulatorio tiene una energía asociada a él. Entre las diferentes formas de energía que se transpor-

tan de un lugar a otro, algunas suceden debido al movimiento de los cuerpos o de las partículas, pero en el caso de las ondas nos encontramos con un fenómeno físico en el cual se presenta un fenómeno de transporte de energía sin que las partículas o cuerpos materiales se desplacen. (Pierce, 1981)

La energía, el momento y la velocidad son propiedades importantes de las ondas. Otra y la verdaderamente sorprendente propiedad que exhiben muchas ondas es la linealidad. Las ondas que no afectan el paso de otras ondas son llamadas ondas lineales ya que el total de dos ondas es simplemente la suma de las ondas como si existieran separadamente. Para una onda lineal, la velocidad no puede depender de la altura o la ‘fuerza’ de la onda, una onda de gran amplitud se puede considerar simplemente como la suma de una serie de ondas de pequeña amplitud. (Pierce, 1981)

El movimiento aparente de una onda es debido a la diferencia de fase en estas oscilaciones entre partículas adyacentes. Estas oscilaciones u órbitas ocurren en planos los cuales son perpendiculares a la dirección aparente del movimiento de la onda. (Nappo, 2002)

Ante un obstáculo, las ondas se refractan, difractan y reflejan. La reflexión de las ondas difiere en otra forma de la “reflexión” de objetos sólidos, éstos tienen una forma permanente la cual mantienen después de la reflexión. La forma de una onda puede ser alterada grandemente cuando es reflejada. Si una onda incide sobre una superficie rugosa puede ser dispersada o reflejada en muchas direcciones. (Pierce, 1981)

Es así como el evento natural del oleaje en el mar, debe entenderse dentro del concepto de onda mecánica.

1.2. El oleaje

EL oleaje es uno de los fenómenos que ocurren en la superficie del mar y es posiblemente el más fácil de apreciar. Se compone de muchas ondas de distintas características (amplitud, frecuencia, fase, longitud de onda, dirección). El oleaje es generado por el efecto del viento sobre un cuerpo de agua, mantiene su existencia por causa de fuerzas restauradoras como la tensión superficial inicialmente, y la asociada a la gravedad, posteriormente. Es conveniente recordar que la diferencia sobresaliente entre la turbulencia y las olas es precisamente la presencia dominante de al menos una fuerza conservativa y restauradora del movimiento ondulatorio. Una vez generadas, las olas pueden propagarse por distancias muy grandes mientras que su disipación puede ser insignificante en ausencia de vientos intensos que pudieran inducir su crecimiento y posteriormente su

rompimiento. Su viaje puede finalizar al arribar a las costas y disipar su energía en forma dramática al romper en playas o acantilados.(Ocampo, 1995)

1.2.1. Definición

Las ondas son deformaciones de una interfase con cierta periodicidad. En oceanografía las olas superficiales son deformaciones en la superficie del mar, esto es, la interfase océano-atmósfera. Las deformaciones se propagan con la rapidez de la onda, mientras que las partículas describen movimientos orbitales u oscilatorios a la rapidez de la partícula y en promedio permanecen en la misma posición.(Tomczak, 2002)

Su altura ronda un metro, entendiéndose la altura como la distancia vertical entre la parte baja y la parte superior de una cresta cercana. Aunque bajo condiciones extremas de sistemas atmosféricos intensos, esto es, velocidades de vientos muy altas, puede alcanzar alturas de varios metros. Su longitud de onda, la distancia entre crestas prominentes, ronda los 50 a 100 metros. Ambas magnitudes son variables, no son constantes en el tiempo ni en el espacio, sus valores varían aleatoriamente. Estas olas fuera de la costa se generan debido al viento, el cual puede ser local, pero también generado por tormentas a distancias lejanas.

Descripción

Según (Tomczak, 2002), la manera más simple de visualizar las olas es mediante el concepto de oscilación armónica (Fig. 1.1). La ola puede ser descrita por su:

- Período T
- Frecuencia $f = \frac{1}{T}$
- Frecuencia angular $\omega = \frac{2\pi}{T}$
- Longitud de onda λ
- Velocidad de fase, velocidad de onda o rapidez $c = \frac{\lambda}{T}$
- Altura de onda $H = 2a$, a es la amplitud
- Pendiente de la onda $\delta = \frac{H}{\lambda}$
- Profundidad a la que se encuentra d

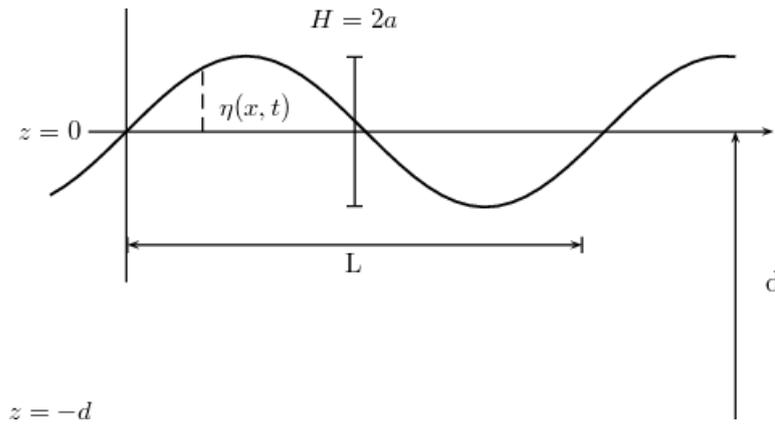


Figura 1.1: Esquema de definición que muestra el dominio de solución para la Teoría Lineal de Ondas

La figura representa las variables que describen el oleaje: altura, longitud de onda, dirección, zona de rompiente, nivel del mar.

En aguas profundas, las trayectorias de las partículas son círculos. El movimiento de las partículas decrece rápidamente (exponencialmente) con la profundidad mientras que en aguas someras las trayectorias son esencialmente las mismas en toda la columna de agua.

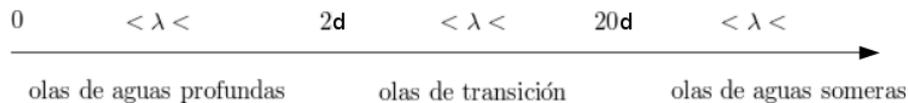


Figura 1.2: Clasificación de las olas según su longitud de onda

En aguas someras o de poca profundidad, las trayectorias de las partículas se deforman a elipses. La transición de ondas en aguas profundas a ondas en aguas someras ocurre cuando la longitud de onda λ es mayor que el doble de la profundidad d . En $\lambda = 20d$ ocurre también un cambio en las propiedades de las ondas.(Fig. 1.2)

En ambos casos, las partículas debajo de la cresta se mueven en la dirección de la propagación de la onda y debajo del valle en la dirección opuesta a la misma.

El decaimiento final de las olas ocurre durante su rompimiento en la playa, lo cual sucede cuando la velocidad de la partícula es mayor que la velocidad de fase (velocidad de onda); la ola decelera a medida entra a la zona de transición, por fricción con el fondo. La energía cinética se convierte en energía potencial. El asomeramiento reduce la longitud de ondas λ y la rapidez c , mientras incrementa la altura de la ola. Este proceso continúa hasta que la ola se vuelve inestable y finalmente rompe. En este estado, las ondas transportan energía y masa hacia la playa. Aún cuando mucha de la energía se disipa en el trabajo mecánico de los sedimentos en la playa, la masa movida

por las olas tiene que ser regresada al mar. Esto ocurre a intervalos regulares a lo largo de la playa en las llamadas corrientes de retorno. Estas son fuertes corrientes de agua hacia afuera de la costa sobre el fondo marino. (Tomczak, 2002)

En aguas someras, la profundidad de rompimiento es aproximadamente

$$d_r \approx \frac{5}{3}H_s = 1,67H_s \quad (1.1)$$

Donde H_s es la altura significativa del oleaje, igual al promedio del tercio de las olas de mayor altura que pasan por el punto de observación en un tiempo determinado.

Mientras que la pendiente de las olas en aguas profundas está dada por H_s/λ .

1.2.2. Oleaje local o mar local

Es el tipo de oleaje producido por fuertes vientos de sistemas atmosféricos en la zona de generación en alta mar. Las características que definen este tipo de oleaje son (Guzmán et al., 2007):

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad.
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas.
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda

1.2.3. Oleaje distante o mar de leva

Cuando el oleaje se propaga y se aleja de la zona donde se generó, ocurren tres fenómenos (Guzmán et al., 2007):

- Decaimiento de energía de las olas.
- Doble dispersión en el oleaje, una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del período, por lo que las olas de mayor longitud de onda más rápido que las cortas. Se produce una especie de filtrado de las olas.
- Fenómeno de fusión, en el cual, las ondas de períodos cercanos se fusionan en largas crestas de ondas, lo que origina que la superficie antes caótica, se simplifique.

Las olas de mar de leva, como cualquier onda mecánica, están sujetas a presentar reflexión, refracción y difracción, en su trayecto hasta arribar a la costa, entendidos como:

Refracción la ola, al acercarse a una zona de menor profundidad, el frente de la ola se frena, se modifica su velocidad, la altura de la ola disminuye y su dirección de propagación.

Reflexión la dirección de la ola cambia después que golpea un obstáculo vertical o barrera (i.e., islas, arrecifes); en el proceso se pierde muy poca energía.

Difracción la energía de la onda se dispersa cuando atraviesa una barrera, aparecen pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por obstáculos. Caracteriza a este sistema de olas, la disminución en su altura en la zona, la rapidez y longitud de onda de la ola no se modifica.

En aguas profundas, la rapidez de las olas es

$$c_D(m/s) = 1,56T \quad (1.2)$$

En aguas someras, la rapidez de las olas es

$$c_s(m/s) = \sqrt{gH} \quad (1.3)$$

En la zona de transición de aguas profundas a aguas someras ($\lambda/2 \leq \text{profundidad} < \lambda$), la rapidez de las olas es

$$c_r(m/s) = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi H}{\lambda}\right)} \quad (1.4)$$

1.2.4. Olas versus mareas

Si se observa el océano por un período de un día se notan incrementos o decrementos apreciables en la altura de alrededor de 1 metro. Estos cambios en el nivel del mar se deben a las mareas, que son otro tipo de onda superficial. Las mareas se originan por los efectos gravitatorios entre la Tierra y otros cuerpos celestes, predominantemente la Luna y el Sol. En cambio como se mencionó anteriormente, la rugosidad de la superficie del mar son generadas por el efecto del viento sobre el agua del océano.

1.2.5. Clasificación

Las olas se clasifican dependiendo de sus propiedades, como las fuerzas que las generan, longitudes de onda, espectro de frecuencias, etc.

Atendiendo las fuerzas que lo generan y en orden ascendente de longitud de onda, se clasifican en:

Forzamiento meteorológico (viento, presión del aire). Por ejemplo, el mar local y el mar de leva.

Sismos Generan maremotos o tsunamis las cuales son ondas en aguas someras u ondas largas.

Mareas (forzamiento astronómico) Son siempre olas en aguas someras u olas largas.

Otra clasificación se basa en la representación, en un espectro de frecuencia, de todas las ondas oceánicas. Distingue entre ondas capilares, ondas gravitatorias, ondas de largo período, ondas de marea y más largas que la marea, como las que se muestran en la figura 1.3. Tomada de (Castro Osuna, 2003)

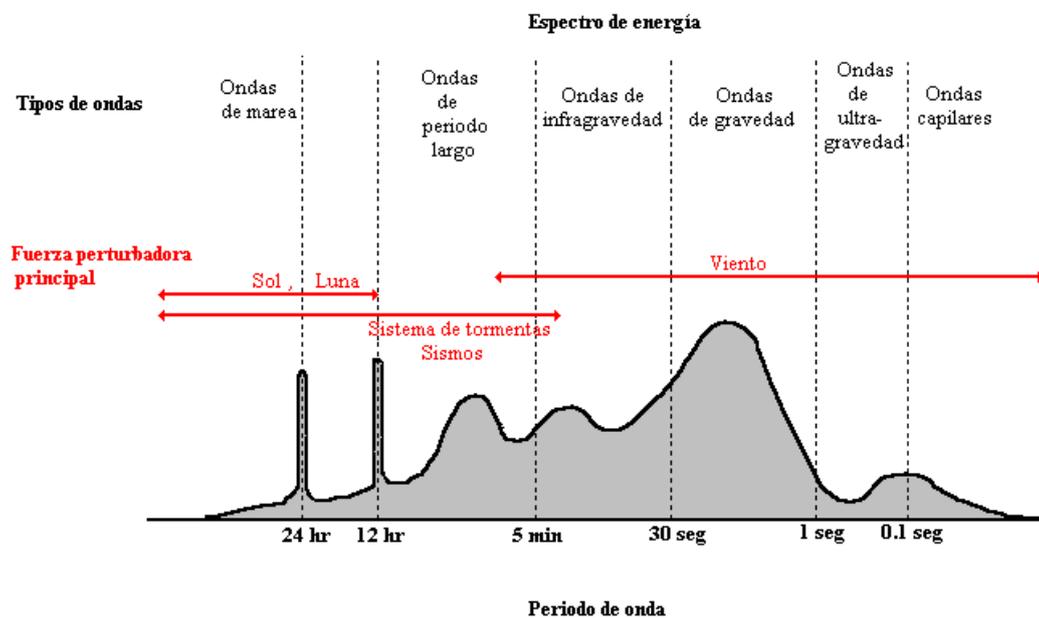


Figura 1.3: Espectros de energía de los diferentes tipos de olas oceánicas.

Diferentes estados de las olas

Las olas oceánicas generadas por el viento pueden dividirse en dos estados: olas de mar (mar local) y ola de mar de leva (swell). (Reddy, 2001, p. 169-170)

Mar local Es la ola generada por el viento en el punto de generación. Es muy irregular y de cresta pequeña.

Ola de mar de leva La ola de mar local que se ha movido fuera del área de generación del viento.

1.3. Teoría de Airy de las ondas

TAMBIÉN conocida como teoría lineal o de pequeñas amplitudes. Esta teoría es útil para estudiar las ondas superficiales, ya que da una descripción linearizada de la propagación de ondas de gravedad en la superficie de una capa de fluido homogéneo. Es a menudo aplicada para el modelado de estados de mar aleatorios. Además, muchas propiedades no lineales de segundo orden de las ondas de gravedad superficiales, y su propagación, pueden estimarse a partir de sus resultados. Esta teoría lineal es a menudo utilizada para obtener un estimado rápido y aproximado de las características de las olas y sus efectos.

Las ondas superficiales son inherentemente no lineales: La solución de las ecuaciones de movimiento depende de las condiciones de frontera en la superficie, pero estas condiciones son las ondas que se desean calcular.

Para tratar las propiedades de las ondas bajo la acción de forzamiento del viento, primero es necesario considerar el caso más idealizado del campo de ondas que se propagan en la ausencia de cualquier forzamiento. Esto conduce a una situación ideal que es difícil matemáticamente y para tratarla requiere muchas suposiciones que la simplifiquen. Por supuesto que, entre menos restricciones se hagan a estas simplificaciones, la complejidad de la solución será mayor. Sólo se tratará la más simple de estas soluciones. No hay que menospreciar las suposiciones asociadas a la teoría de ondas de Airy, ya que su rango de aplicación es extensivo. (Young, 1999)

Para ello se comienza asumiendo que la amplitud de las ondas en la superficie del agua es infinitamente pequeña de forma que la superficie es casi exactamente un plano. Para simplificar las matemáticas, puede asumirse que el flujo es bidimensional con ondas viajando en la dirección x . Además se desprecian los efectos por la fuerza de Coriolis y la viscosidad. Si se considera la rotación, se obtienen ondas Kelvin, las cuales balancean la Fuerza de Coriolis contra una frontera topográfica como una línea de costa.

Con esas suposiciones, la elevación de la superficie del océano de una onda viajera en la dirección x es:

$$\zeta(x, t) = a \sin(kx - \omega t) \quad (1.5)$$

Con

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad (1.6)$$

Siendo a la amplitud, k el vector número de onda, ω la frecuencia angular, f frecuencia intrínseca, T el período y L la longitud de onda.

1.3.1. Ecuaciones gobernantes

Según (Young, 1999, p. 3), para formar una solución simple se hacen las siguientes suposiciones simplificadoras:

1. El agua es de una profundidad constante, d y longitud de onda L (o período, T)
2. El movimiento de la onda es bidimensional, que conduce a las crestas largas de las olas de altura constante a lo largo de las crestas.
3. Las ondas son de una forma constante, es decir, no cambian con el tiempo
4. El fluido (agua) es incompresible
5. Los efectos de viscosidad, turbulencia y tensión superficial son despreciados
6. La altura de la onda, H es pequeña comparada a la longitud de onda, L y la profundidad del agua, d (i.e. $H/L \ll 1$ $H/d \ll 1$)

Las ecuaciones gobernantes al ser resueltas representan las ecuaciones para la conservación de la masa y el momento. La conservación de la masa puede ser escrita en términos de la ecuación de Laplace (Young, 1999, p. 4-5)

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1.7)$$

donde x y z son las coordenadas horizontales y verticales, respectivamente, del dominio de la solución bidimensional. El potencial de velocidad, ϕ está definido en términos de las componentes horizontal y vertical de la velocidad, u y w como

$$u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1.8)$$

$$w(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (1.9)$$

y t es el tiempo.

La conservación del momento está representada por la ecuación de Bernoulli inestable

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho_w} + gz = 0 \quad (1.10)$$

donde p es la presión, ρ_w la densidad del fluido (agua) y g la aceleración gravitacional. Es deseable resolver 1.7 y 1.10 dentro del dominio representado por la figura 1.1 y sujetos a las condiciones de frontera definidos abajo

(i) Condición de Frontera Dinámica en la superficie libre:

En la superficie libre, $z = \eta$, la presión es atmosférica, $p = 0$. Por tanto 1.10 llega a ser

$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\eta = 0 \text{ en } z = 0 \quad (1.11)$$

La condición de frontera, 1.11 ha sido aplicada a $z = 0$ en vez de $z = \eta$ ya que una de las suposiciones simplificadoras fue que las ondas fuesen de pequeña amplitud (i.e. $\eta \rightarrow 0$)

(ii) Condición de Frontera Cinemática en la superficie libre:

En la superficie libre no puede haber transporte de fluido a través de la superficie libre. Por tanto, la velocidad vertical de la superficie libre debe ser igual a la velocidad vertical del fluido (i.e. $w = D/Dt[\eta(x, t)]$).

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \text{ en } z = \eta \quad (1.12)$$

Sustituyendo 1.9 por w , nótese que debido a la suposición de pequeña amplitud la pendiente de la superficie del agua $\partial \eta / \partial x$ será pequeña y que la condición de frontera puede ser asumida aplicada a $z = 0$ reduce 1.12 a

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \text{ en } z = 0 \quad (1.13)$$

(iii) Condición de Frontera Cinemática en el fondo:

En una manera similar a la condición de frontera cinemática en la superficie libre, no puede haber flujo en el fondo sólido

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ en } z = -d \quad (1.14)$$

Por tanto, el problema llega a ser la solución de 1.7 sujeta a las condiciones de frontera 1.11, 1.13 y 1.14.

Una solución a este conjunto de ecuaciones puede encontrarse usando el método de separación de variables.(Young, 1999, p. 5)

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh[kd]} \cos(kx - \omega t) \quad (1.15)$$

donde $a = H/2$ es la amplitud de la onda, $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ es la frecuencia angular de la onda y $k = 2\pi/L$ es el número de onda. De 1.15 las propiedades básicas de las olas lineales puede desarrollarse.

1.3.2. El perfil de la onda

La ecuación 1.11 establece que en la superficie libre

$$\eta = \frac{1}{g} \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{z=0} \quad (1.16)$$

Sustituyendo 1.15 por ϕ en la ecuación anterior y derivando con respecto a t , el perfil de la onda η es

$$\eta = a \sin(kx - \omega t) \quad (1.17)$$

Por lo tanto la superficie del agua varía en un comportamiento sinusoidal y es periódico tanto en espacio (longitud de onda L) y tiempo (período T). (Young, 1999, 6)

1.3.3. Relación de dispersión

Combinando 1.11 y 1.13 se obtiene

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \text{ en } z = 0 \quad (1.18)$$

Sustituyendo 1.15 en 1.18 y evaluando en $z=0$ resulta

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (1.19)$$

La ecuación 1.19 es llamada la relación de dispersión para ondas lineales. Establece que hay una única relación entre ω , k y d (o entre T , L y d). Si dos de estas cantidades son conocidas, la tercera está únicamente definida. (Young, 1999, p. 6)

1.3.4. Rapidez de fase de la onda

Por definición, la rapidez de fase o rapidez de propagación, C de una onda es

$$C = \frac{L}{T} \text{ o } \frac{\omega}{k} \quad (1.20)$$

combinando las dos ecuaciones anteriores para ω se obtiene

$$C^2 = \frac{g}{k} \tanh(kd) \quad (1.21)$$

La ecuación anterior indica que la rapidez de fase varía con la profundidad del agua. Para valores de ω y k la ola se propagará más rápido en aguas profundas que en aguas someras. Además, C varía como una función de ω o k . Las olas de período grande o de longitud de onda grande se propagarán más rápido que las olas de período corto o de longitud de onda pequeña.

Las olas se separarían gradualmente basadas en sus respectivas longitudes de onda. Las olas más largas se guiarían seguidas por las progresivamente más cortas. Por lo tanto, el campo de olas se dispersaría gradualmente. Esto da sentido al nombre, “relación de dispersión”. (Young, 1999, p. 7)

1.3.5. Longitud de onda

Similarmente, combinando las dos ecuaciones anteriores da una relación trascendental para la longitud de onda, L

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (1.22)$$

La naturaleza de estas ecuaciones significa que se requieren técnicas de solución iterativas. (Young, 1999, p. 7)

1.3.6. Movimiento de las partículas de agua

Las componentes horizontales y verticales de la velocidad del fluido (velocidad de la partícula de agua) están definidas por 1.8 y 1.9. La sustitución de 1.15 en estas relaciones conduce a

$$u = \frac{agk}{\omega} \frac{\cosh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (1.23)$$

$$w = \frac{agk}{\omega} \frac{\sinh[k(d+z)]}{\cosh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (1.24)$$

El desplazamiento horizontal y vertical de una partícula de fluido puede encontrarse calculando la ruta por integración en un tiempo dt empleando las ecuaciones para la velocidad u y v . Las ecuaciones resultantes se reordenan para obtener

$$\frac{\xi^2}{A^2} + \frac{\zeta^2}{B^2} = 1 \quad (1.25)$$

la cual es la ecuación de una elipse con

$$A = a \frac{\cosh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \quad (1.26)$$

$$B = a \frac{\sinh[k(d+z)]}{\sinh(kd)} \quad (1.27)$$

Por lo tanto, por la teoría lineal de olas, las partículas del fluido se mueven en órbitas elípticas cerradas. En aguas profundas $A = B$ y la órbita es un círculo. (Young, 1999, p. 8)

1.3.7. Trenes de ondas y velocidad de grupo

La velocidad de fase es la velocidad con la que viajan las olas individuales y la velocidad de grupo es la velocidad con la que viajan el grupo o tren de olas, y es a ésta velocidad a la que también viaja la energía.

La ecuación 1.17 define la elevación de la superficie del agua de un sólo tren de onda lineal. Considérese ahora una superficie de agua consistente de dos trenes de onda definidos por la forma general de cada uno. Cada tren tiene la misma amplitud a , pero diferentes frecuencias ω_1 y ω_2 , respectivamente (Young, 1999, p. 13). La elevación de la superficie del agua es entonces:

$$\eta = a \sin(k_1 x - \omega_1 t) + a \sin(k_2 x - \omega_2 t) \quad (1.28)$$

$$\begin{aligned} &= 2a \cos[1/2(k_1 - k_2)x - 1/2(\omega_1 - \omega_2)t] \\ &\quad \times \sin[1/2(k_1 + k_2)x - 1/2(\omega_1 + \omega_2)t] \end{aligned} \quad (1.29)$$

El primer término de la segunda ecuación anterior, representa una amplitud que varía en el espacio y tiempo del tren de onda. El tren de onda resultante está caracterizado por patrones de interferencia y la aparición de grupos de ondas como los que se muestran en la figura 1.4.

La elevación de la superficie del agua η es cero cuando el primer término es cero. Esto ocurre cuando

$$1/2(k_1 - k_2)x - 1/2(\omega_1 - \omega_2)t = (2m + 1)\pi/2 \quad (1.30)$$

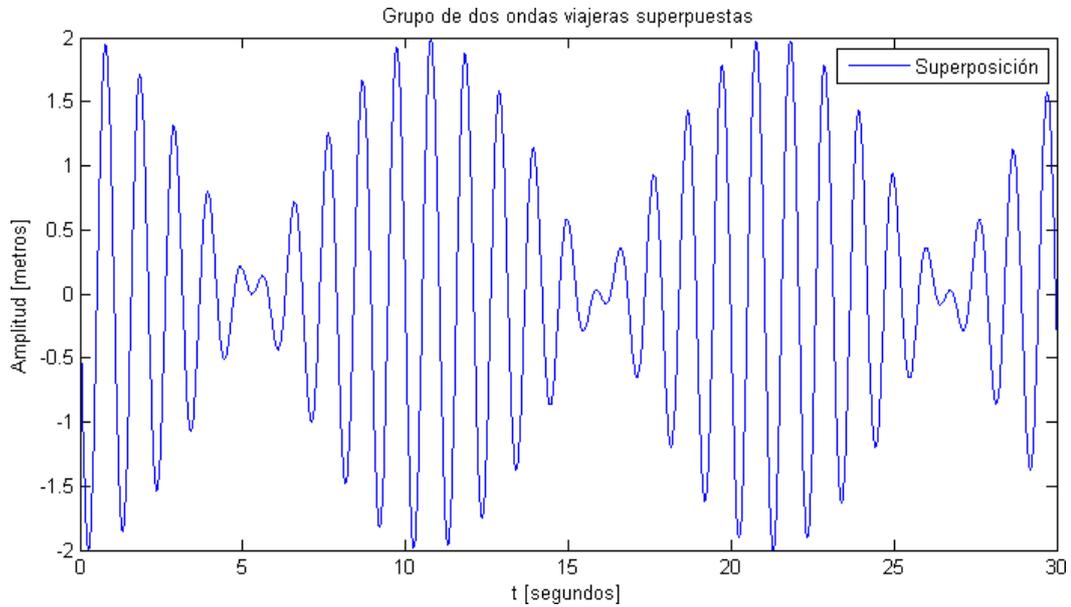


Figura 1.4: La formación de grupos de onda como el resultado de la superposición de dos trenes de onda lineales con distintas frecuencias.

donde m es un contador entero (i.e. $m = 0, 1, 2, \dots$). Por lo tanto, la envolvente de la figura 1.4 de la elevación de la superficie del agua será cero en $x = x_{nodo}$ dado por

$$x_{nodo} = \left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \right] t + \frac{(2m + 1)\pi}{k_1 - k_2} \quad (1.31)$$

La rapidez de propagación del punto nodal y por tanto el “grupo” de onda es

$$C_g = \frac{dx_{nodo}}{dt} \approx \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2} \quad (1.32)$$

donde C_g es llamada la velocidad de grupo. En el límite en que ω_1 se aproxima a ω_2 , se convierte en

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (1.33)$$

sustituyendo la relación de dispersión en la ecuación anterior y diferenciando se tiene

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] C \quad (1.34)$$

El resultado, nos dice que, la velocidad de grupo es la mitad de la velocidad de fase en aguas profundas e igual a la velocidad de fase en aguas poco profundas. (Young, 1999, p. 14)

1.3.8. Limitaciones de la teoría lineal

La teoría de olas desarrollada en la sección anterior asumía que la altura de la ola era tan pequeña que las condiciones de frontera dinámica y cinemática en la superficie libre podían ser aplicadas aún a nivel del agua, $z = 0$ en vez de aplicarse en la superficie distorsionada de la ola $z = \eta$. En la naturaleza, la pendiente de la ola, H/L a veces excede 0.05 a 0.08 y por tanto la asunción de amplitudes pequeñas es a menudo válida. Hay, sin embargo, algunas aplicaciones donde las asunciones simplificadoras de la Teoría Lineal de las Olas se vuelven significantes. En tales casos, es necesario resaltar el uso de una teoría no lineal o *teoría de olas de amplitud finita*. Tales teorías requieren que las condiciones de frontera en la superficie libre sean aplicadas a la superficie libre, la cual es, inicialmente desconocida ya que la forma de la ola es parte de la solución. El problema se vuelve tratable mediante el uso de métodos de perturbación. Tal análisis asume que las no linealidades representan sólo pequeñas correcciones a la teoría lineal. (Young, 1999, p. 19)

1.4. Ondas y el concepto de un espectro de onda

LOS conceptos de altura significativa de onda y período son muy útiles en muchas situaciones. Sin embargo, emplear sólo dos parámetros dan una descripción limitada de las condiciones de oleaje. Por ejemplo, las condiciones de oleaje pueden ser similares en el sentido de que la altura de la ola y período son iguales, pero que todavía pueden ser muy diferentes en detalle: una mezcla de estado de mar local (período corto, superficie irregular, olas generadas localmente) y mar de leva (período largo, olas lisas, generado en una tormenta lejana) puede tener la misma altura significativa y período que un ligeramente mayor mar local sin mar de leva. Para distinguir entre ambas condiciones, se necesitan más parámetros, por ejemplo, una altura significativa y un período para el mar local y el de leva de forma separada. Para una descripción completa (en un sentido estadístico), otra técnica, la espectral, se requiere. Está basada en la noción que el movimiento aleatorio de la superficie del mar puede tratarse como la sumatoria de un gran número de componentes de onda armónicas (Holthuijsen, 2007, p. 25).

Debido a la irregularidad de este fenómeno, se vuelve necesario una aproximación probabilística o espectral para comprenderlo. La aleatoriedad se debe a la gran variedad de olas con diferentes alturas, períodos y direcciones de propagación. Y precisamente, la forma más simple de incorporar la colección de olas de diferentes escalas es utilizando una descripción espectral (Bolaños Sánchez, 2007, p. 21).

Neuman fue el primero en proponer una forma funcional del espectro del oleaje, al obtener

un espectro energía a partir del histograma de la energía de olas individuales en sus respectivos períodos. (Bolaños Sánchez, 2007, p. 21)

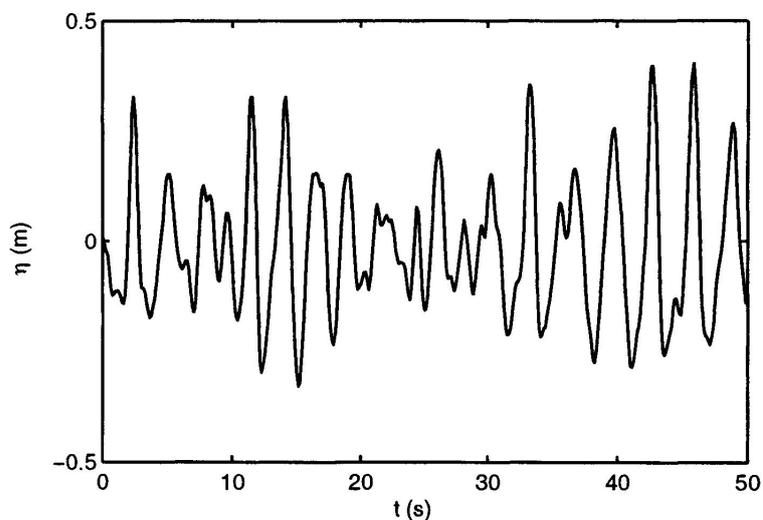


Figura 1.5: Un registro típico de olas medido en el lago George, Australia.

Si se observa cuidadosamente el mar, se notará que las ondas superficiales no son sinusoidales puras, sino están compuestas aleatoriamente por ondas de varias longitudes y períodos. Con algunas simplificaciones, se puede describir cercanamente esta superficie. Estas simplificaciones llevan al concepto de espectro de ondas oceánicas. El espectro da la distribución de la energía de la onda entre distintas frecuencias o longitudes de onda en la superficie del mar.

El espectro de energía se distribuye sobre un rango de frecuencias, amplitudes (elevaciones) y direcciones. (Bolaños Sánchez, 2007, p. 22)

En muchas áreas de la física es común representar registros mediante el uso de un modelo espectral o de Fourier tales como el de la figura 1.5 (tomada de (Young, 1999, p. 21)) medido a una profundidad de agua de aproximadamente 2m, con una rapidez de viento de, $U_{10} = 16,3m/s$, nótese la variación en altura y período de las ondas individuales en el registro. Bajo esta aproximación, la elevación de la superficie del agua está aproximada por la superposición lineal de formas sinusoidales definidas según (Young, 1999, p. 20):

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin \omega_i t + \phi_i \quad (1.35)$$

donde a_i , ω_i y ϕ_i son la amplitud, frecuencia y fase de la i -ésima componente en la sumatoria

Joseph Fourier, mostró que casi cualquier función $\zeta(t)$ o $\zeta(x)$, puede representarse sobre el intervalo $-T/2 \leq t \leq T/2$ como la suma de una serie infinita de funciones seno y coseno con

frecuencias de onda armónicas

$$\zeta(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi nft + b_n \sin 2\pi nft) \quad (1.36)$$

donde

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) \cos 2\pi nft, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.37)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) \sin 2\pi nft, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.38)$$

$f = 1/T$ es la frecuencia fundamental, y nf son los armónicos de la frecuencia fundamental. Esta forma de $\zeta(t)$ es llamada una serie de Fourier. Notar que a_0 es el valor medio de $\zeta(t)$ sobre el intervalo.

Empleando la fórmula de Euler, $\zeta(t)$ puede expresarse como

$$\zeta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Z_n e^{i2\pi nft} \quad (1.39)$$

donde

$$Z_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \zeta(t) e^{i2\pi nft} dt, \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1.40)$$

a Z_n se le conoce como la transformada de Fourier de $\zeta(t)$.

El espectro $S(f)$ de $\zeta(t)$ es:

$$S(nf) = Z_n Z_n^* \quad (1.41)$$

La expresión anterior es la que se utiliza para describir la computación del espectro de onda oceánico. Se puede expandir la idea de la serie de Fourier para representar superficies $\zeta(x, y)$ como una serie infinita de funciones seno y coseno orientadas en todas las direcciones posibles. Aplicando estas ideas y debido a que las longitudes de onda y frecuencias están relacionadas a través de la relación de dispersión, puede representarse la superficie oceánica como una suma infinita de funciones seno y coseno de diferentes frecuencias moviéndose en todas las direcciones.

Nótese en la discusión de las series de Fourier que asumimos que los coeficientes (a_n, b_n, Z_n) son constantes. Para tiempos de entre una hora, y distancias de una decena de kilómetros, las ondas en la superficie oceánica están suficientemente fijas para que la asunción sea cierta. Además, las interacciones no lineales entre las ondas son muy débiles. Por lo tanto, podemos representar una

superficie de mar local por una superposición de ondas reales sinusoidales que tienen diferentes longitudes de ondas o frecuencias y diferentes fases viajando en direcciones muy diferentes.

Las series de Fourier no sólo son una expresión matemática conveniente, establecen que la superficie del mar está verdaderamente compuesta de ondas seno, cada una propagándose acorde a las ecuaciones de la teoría lineal de las ondas superficiales oceánicas.

El concepto de la superficie del mar está compuesto de ondas independientes que pueden ser llevadas más lejos. Supóngase que se tira una roca en un océano en calma, y hace una gran salpicadura. Según Fourier, la salpicadura puede representarse como una superposición de ondas coseno casi todas de fase cero de tal forma que las olas se suman a un gran chapoteo en el origen. Por otra parte, cada ola de Fourier luego comienza a alejarse de la salpicadura. Las olas más largas viajan más rápido y, eventualmente, lejos de la salpicadura, el mar se compone de un tren disperso de ondas con olas más largas más lejos de la salpicadura y las olas más cortas más cerca. (Stewart, 2007, p. 277-279)

1.4.1. Espectro direccional

Una extensión más nueva del modelo de Fourier representado por 1.35 es la que además incluye la posibilidad de componentes de la onda propagándose en direcciones diferentes

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N a_i \sin[k_i(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i)] - \omega_i t + \phi_i \quad (1.42)$$

donde θ_i es el ángulo entre el eje x y la dirección de propagación de la i -ésima componente en la sumatoria. Con esta representación, puede definirse de manera similar para $F(f)$ un espectro en frecuencia-dirección o espectro direccional, $F(f, \theta)$

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f, \theta) df d\theta \quad (1.43)$$

El espectro direccional define la distribución de energía en la frecuencia y la dirección. (Young, 1999, p. 23)

1.4.2. Adquisición de un espectro

Las técnicas empleadas para adquirir un espectro uni o bi-dimensional son esencialmente las siguientes (Holthuijsen, 2007, p. 51):

- Medir la elevación de la superficie del mar con técnicas *in situ* o sensores remotos y analizar los registros, o
- Predecir el espectro con modelos numéricos de oleaje usando información de viento, marea y batimetría.

1.4.3. Crecimiento limitado por fetch y por duración

Son muchos los factores que contribuyen al desarrollo de un campo de oleaje, por ejemplo: la velocidad del viento y su variación, la línea de costa con su posición y geometría, y la profundidad del agua.

El crecimiento por fetch limitado ocurre cuando un viento de magnitud constante y dirección sopla perpendicular a lo largo y recto de una línea de costa (Young, 1999, p. 83). El agua se asume profunda y el viento sopla por un tiempo lo suficientemente largo que el campo de olas alcanza el estado estacionario (independiente del tiempo). Por tanto, para la rapidez de viento dada, el campo de oleaje se transforma en una función de la distancia desde la línea de costa, la cual es llamada fetch, x .

1.4.4. El espectro de olas oceánicas

Las olas oceánicas son producidas por el viento. Entre más rápido es el viento, sopla durante más tiempo, y mayor el área sobre la cual el viento sopla, son mayores las olas. En el diseño de barcos o estructuras costeras se desea saber las mayores olas producidas para una rapidez de viento dada. Según (Stewart, 2007, p. 283), varios espectros idealizados se utilizan para responder a este planteamiento. Quizás el más simple es el propuesto por Pierson y Moskowitz (1964). Ellos asumieron que si el viento soplaba sostenidamente por un largo tiempo y sobre una gran área, las olas llegarían a una condición de equilibrio con el viento. Este es el concepto de *mar completamente desarrollado*. Ellos calcularon el espectro de olas para varias rapidezces de viento, y encontraron que la función

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (1.44)$$

era un buen ajuste al espectro observado, donde $\omega = 2\pi f$, f es la frecuencia de la onda en Hertz, $\alpha = 8,1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0,74$, $\omega_0 = g/U_{19,5}$ y $U_{19,5}$ es la rapidez del viento a una altura de 19.5m sobre la superficie del mar, la cual es la altura de los anemómetros de los barcos climáticos usados por Pierson y Moskowitz (1964).

Para la mayoría del flujo de aire sobre el mar, la capa límite atmosférica tiene casi estabilizada neutral, y

$$U_{19,5} \approx 1,026U_{10} \quad (1.45)$$

asumiendo un coeficiente de arrastre de $1,3 \times 10^{-3}$

La frecuencia en el punto máximo del espectro de Pierson-Moskowitz es calculado al resolver $dS/d\omega = 0$ para ω_p , para obtener

$$\omega_p = 0,877g/U_{19,5} \quad (1.46)$$

La rapidez de las olas en el punto máximo se calcula a partir de la velocidad de fase para aguas profundas ($c = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega}$), lo cual resulta

$$c_p = \frac{g}{\omega_p} = 1,14U_{19,5} \approx 1,17U_{10} \quad (1.47)$$

Por consiguiente, las ondas con una frecuencia ω_p viajan un 14 % más rápido que el viento a una altura de 19.5m o 17 % más rápido que el viento a una altura de 10m.

Integrando $S(\omega)$ en todas las ω se obtiene la varianza de la elevación de la superficie

1.4.5. La forma JONSWAP del espectro

El Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), fue un intento internacional para investigar la evolución de la ola de fetch limitado. La medición consistió de 13 estaciones espaciadas a lo largo de un transecto de 160km (Young, 1999, p. 93). desde el norte de Alemania hasta el Mar del Norte. La información se colectó durante cuatro semanas en Julio de 1969.

Basado en la formulación de alta frecuencia de Phillips (1985), el experimento JONSWAP encontró que el espectro en frecuencia de las olas limitadas por fetch podían ser representadas en la forma

$$F(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (1.48)$$

Donde:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a & \text{para } f \leq f_p; \\ \sigma_b & \text{para } f > f_p. \end{cases}$$

y $F(f)$ es el espectro de energía y f es la frecuencia. Los parámetros f_p y α son parámetros de escala; f_p representa la frecuencia al máximo del espectro y α corresponde a la “constante” de proporcionalidad de Phillips. Los tres parámetros restantes definen la forma del espectro: γ , el factor de mejora, es la razón del máximo de energía espectral al máximo del espectro de Pierson-Moskowitz correspondiente con el mismo valor de α y σ_a y σ_b .

HASSELMANN luego de analizar las mediciones del JONSWAP planteó que el concepto de mar completamente desarrollado no ocurre en la naturaleza sino que continúa desarrollándose mediante las interacciones no lineales entre olas por períodos y distancias mayores a las que supusieron PIERSON - MOSKOWITZ.

1.5. Ecuación de transferencia radiativa

ESTA ecuación representa la evolución temporal y espacial del espectro direccional como un resultado de procesos físicos, tales como entrada atmosférica por el viento, disipación, fricción con el fondo e interacciones no lineales débiles.

1.5.1. Cinemática

Anteriormente se mostró que de acuerdo a la teoría lineal de las ondas, la fase de una componente individual de onda propagándose en dos dimensiones espaciales está dada por la relación

$$\Psi = k \cdot x - \omega t \quad (1.49)$$

el vector número de onda, k y la frecuencia, ω deducidas como

$$k = \nabla \Psi \quad (1.50)$$

$$\omega = -\frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1.51)$$

las ecuaciones conducen a la ecuación de la *conservación de crestas*

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \quad (1.52)$$

la cual indica que los cambios espaciales en la frecuencia deben estar asociados con un cambio local en el número de onda. Como su nombre lo sugiere, demuestra que para cualquier área

bidimensional, el número de crestas de ondas entrantes al área debe ser igual al número de las que salen. La ecuación para k conduce directamente a la ecuación del rotacional de k

$$\nabla \times k = 0 \quad (1.53)$$

1.6. Términos fuente

EL término fuente, S_{tot} representa todos los procesos físicos en los cuales transfiere energía a, desde o entre el espectro. Consistente con la inherente asunción de la superposición lineal en la representación espectral, puede representarse como la sumatoria de procesos independientes

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_b + \dots \quad (1.54)$$

donde

- $S_{in} \equiv$ entrada atmosférica del viento
- $S_{nl} \equiv$ interacciones no lineales entre componentes espectrales
- $S_{ds} \equiv$ disipación debido a la espuma blanca¹
- $S_b \equiv$ disipación debido a la interacción con el fondo

Los cuatro procesos listados anteriormente no son exhaustivos e indudablemente hay muchos otros factores que influyen en la evolución de las olas. El conocimiento en esta área está lejos de estar completo. Sin embargo, parecen contribuir en mayores flujos de energía al espectro. Los primeros tres son importantes en aguas profundas y se describirán a continuación. Las interacciones con el fondo son claramente aplicables en aguas con profundidad finita (aguas someras). (Young, 1999, p. 45)

1.6.1. Entrada atmosférica, S_{in}

Es razonable asumir que las olas son generadas como el resultado de variaciones en el esfuerzo generado por el viento sobre la superficie del agua. Esas pueden ser esfuerzos ya sea normales (presión) o de cizalladura.

¹ conocido en la literatura inglesa como white-capping

Tolman y Chalikov proponen la siguiente forma del término debido al esfuerzo del viento:

$$S_{in}(k, \theta) = \sigma\beta N(k, \theta) \quad (1.55)$$

Donde β es un parámetro sin dimensiones de la interacción entre el viento y la onda.

1.6.2. Cuadruplete de interacciones no lineales, S_{nl}

En primer orden, las olas pueden considerarse como la superposición de componentes espectrales libres e independientes. A mayor orden, sin embargo, existen interacciones entre las componentes espectrales las cuales resultan en una transferencia de energía entre las componentes. El orden más bajo en el cual tales interacciones pueden ocurrir, involucra la interacción de tres ondas, *interacciones de triadas*. En tales casos, dos ondas interactúan no linealmente y transfieren energía a la tercera componente. Tales interacciones son importantes en condiciones de profundidad finita pero son insignificantes en aguas profundas. Una teoría de perturbación general para la interacción resonante no lineal de olas en un mar cualesquiera fue desarrollado por Hasselmann (1962, 1963). Él encontró que un conjunto de cuatro olas, llamadas un cuadruplete, podrían intercambiar energía cuando se satisfacen las siguientes condiciones de resonancia:

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \quad (1.56)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \quad (1.57)$$

donde ω_j es la frecuencia en radianes y k_j los vectores números de onda ($j = 1, \dots, 4$). La frecuencia y el número de onda están relacionados a través de la relación de dispersión. Las cuatro componentes de onda que interactúan forman el cuadruplete y están descritas por 1.56 y 1.57.

Hasselmann describió las interacciones no lineales entre cuadrupletes de onda en términos de su densidad de acción, n , donde $n(\mathbf{k}) = Q(\mathbf{k})/\omega$ y $Q(\mathbf{k})$ es el espectro de número de onda. Hasselmann asumió que las olas solamente eran débilmente no lineales y por tanto aplicó una técnica de perturbación para determinar la razón de cambio en la densidad de acción en \mathbf{k}_1 debido a todas las interacciones de cuadruplete involucrando \mathbf{k}_1 . La razón de cambio $\partial n_1/\partial t$, la cual está relacionada directamente a $S_{nl}(f, \theta)$ es

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = \int \int \int G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_4) \times \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_4) \times \delta(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 - \omega_4)$$

$$\times [n_1 n_3 (n_4 - n_2) + n_2 n_4 (n_3 - n_1)] d\mathbf{k}_1 d\mathbf{k}_2 d\mathbf{k}_3 \quad (1.58)$$

donde $n_j = n(\mathbf{k}_j)$ es la densidad de acción al número de onda \mathbf{k}_j y G es un coeficiente de acoplamiento. Las funciones delta garantizan que las contribuciones a la integral sólo ocurren para cuádrupletes que satisfacen las condiciones de resonancia. La expresión integral anterior es también conocida como la integral de Boltzmann para olas de viento, en analogía a expresiones similares usadas en física teórica para describir la razón de cambio de las distribuciones de densidad de partículas en un sistema de partículas interactuantes.

1.6.3. Espuma blanca, S_w

También conocida como disipación por rompimiento en aguas profundas o por el término en inglés *whitecapping*. Y es que, según Young (1999) la transferencia de energía del viento a las olas da como resultado un aumento en la amplitud de la ola. Este proceso continúa hasta que la ola llega a ser inestable y rompe. El rompimiento está controlado por la pendiente de la ola, en contraste con el rompimiento por la profundidad limitada, como ocurre en la playa. Este rompimiento se manifiesta como la espuma blanca que se forma en la cresta de las olas. La expresión usada en un modelo numérico que describe la disipación de energía de las olas en aguas profundas en la zona de fuertes tormentas o zona de generación, es

$$S_{ds} = S_w(k, \theta) = C_{ds} \hat{\sigma} \frac{k}{\hat{k}} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}} \right)^2 N(k, \theta) \quad (1.59)$$

donde, C es una constante, α_{PM} es el valor de α para el espectro Pierson-Moskowitz.

La energía se pierde debido a que la cresta de la onda es forzada hacia delante por el viento que es más rápido que lo que la ola propiamente está viajando. Mucha de la energía durante la “espuma blanca” es convertida en momento de avance del agua, reforzando la corriente superficial iniciada por la energía del viento transferida a la superficie oceánica vía una fuerza tangencial. (Brown et al., 1997)

1.6.4. Fricción con el fondo oceánico, S_{bot}

El término propuesto para este mecanismo de disipación de energía es

$$S_{bot}(k, \theta) = 2\Gamma \frac{n - 0,5}{gd} N(k, \theta) \quad (1.60)$$

donde, Γ es una constante empírica distinta para mar de leva y mar local, y

$$n = \frac{c}{c_g} \quad (1.61)$$

1.7. Pronóstico del oleaje

NUESTRA comprensión de las olas del océano, sus espectros, su generación por el viento, y sus interacciones son ahora lo suficientemente bien entendidos así que el espectro de la ola se puede pronosticar utilizando vientos calculados de modelos meteorológicos numéricos. Si observamos algunas zonas oceánicas pequeñas, o algún área sólo fuera de la costa, podemos ver olas generadas por el viento local, el viento del mar, además de olas que se generaron en otras áreas en otras ocasiones y que se han propagado en la zona que estamos observando, el oleaje. Los pronósticos de condiciones de oleaje local deben incluir tanto el mar y el oleaje, por lo tanto, el pronóstico de oleaje no es un problema local. (Stewart, 2007)

Diversas técnicas se han utilizado para pronosticar el oleaje. Los primeros intentos se basaron en relaciones empíricas entre la altura de las olas y la longitud de onda y la velocidad del viento, la duración, y el fetch. El desarrollo del espectro de ondas permitió la evolución individual de las componentes del oleaje con frecuencia f viajando en la dirección del espectro direccional del oleaje

$$\frac{\partial \Psi_0}{\partial t} + c_g \cdot \nabla \Psi_0 = S_i + S_{nl} + S_d \quad (1.62)$$

Donde $\Psi_0 = \Psi_0(f, \theta; x, t)$ varía en el espacio x y el tiempo t , S_i es la entrada del viento dada por los mecanismos de Phillips (1957) y Miles (1957), S_{nl} es la transferencia entre los componentes de oleaje debido a las interacciones no lineales, y S_d es la disipación.

La tercera generación de modelos de pronóstico de oleaje ahora utilizados por agencias meteorológicas en todo el mundo se basan en la integración de la ecuación anterior usando muchas componentes de ola individuales (El Grupo SWAMP de 1985; El Grupo WAMDI, 1988; Komen et al, 1996). Los pronósticos siguen cada uno de las componentes del espectro de oleaje en el espacio y el tiempo, permitiendo que cada componente crezca o decaiga en función de los vientos locales, y permitir que las componentes del oleaje interactúen acorde a la teoría de Hasselman. Típicamente, el mar está representado por 300 elementos: 25 longitudes de onda que van en 12 direcciones (30 grados). Para reducir el tiempo de cálculo, los modelos utilizan una red de puntos anidados: la red tiene una alta densidad de puntos en las tormentas y cerca de las costas y una baja densidad en otras regiones.

1.7.1. Variabilidad de los datos de viento

La variabilidad en la dirección del viento es debido a la atmósfera inestable pero también está relacionada con la magnitud del viento. Se observa una mayor variabilidad del viento a mayores intensidades, por lo tanto, la variabilidad es mayor en condiciones de tormenta. Dichas inestabilidades son relativamente largas y no deben ignorarse. A pesar de ello, los vientos utilizados como entrada en los modelos de predicción de oleaje no reproducen esta variabilidad (Bolaños Sánchez, 2007)

1.8. Wavewatch III

EL modelo numérico llamado WAVEWATCH III es un modelo de predicción de oleaje de tercera generación, desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y los National Centers for Environmental Prediction - NCEP en el mismo espíritu del modelo WAM (WAMDIG 1988, Komen et al. 1994) desde finales de 1990 hasta 1999 por Hendrik Tolman. Constituye un avance significativo respecto a los modelos WAVEWATCH desarrollados por la Delft University of Technology y el modelo WAVEWATCH II desarrollado por el NASA Goddard Space Flight Center. WAVEWATCH III difiere de sus predecesores en muchos puntos importantes tales como las ecuaciones gobernantes, la estructura del modelo, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas.

El modelo WAVEWATCH III resuelve la ecuación de balance de densidad de acción de fase espectral aleatoria, para un espectro completo de número de olas en determinada dirección. En las ecuaciones se asume, de forma implícita, que las propiedades de un medio (profundidad y corriente) varían en escalas de tiempo y espacio que son mucho mayores a las escalas de variación de una única ola. En la versión 3.14 se han incluido algunas opciones de configuración para aguas extremadamente someras (zonas de surfteo), así como para el “mojado” y “secado” de puntos de la malla.

El código fuente del modelo numérico WW3 en su versión 2.22 se encuentra disponible en internet mediante previo registro del usuario, mientras que la distribución de la versión 3.14 requiere la previa aceptación de una licencia estilo software libre, a través de un sitio de distribución protegido por contraseña. Para obtener acceso al sitio, es necesario ir a la página web de la licencia. Estando de acuerdo con la licencia, se proveerá información de un identificador de usuario (ID) y una contraseña.

1.8.1. Características del modelo

- Las ecuaciones gobernantes incluyen refracción del campo de olas debido a variaciones temporales y espaciales de la batimetría y la corriente promedio. Además del crecimiento de la ola y decaimiento debido a las acciones del viento, interacciones resonantes no lineales, disipación y fricción con el fondo.
- La propagación del oleaje se considera lineal, sin embargo, efectos no lineales relevantes tales como interacciones resonantes están incluidas en los términos fuente (física)

- Incluye representación en sub-mallas de islas no resolvibles
- Incluye dos opciones de términos fuente
 - El primero basado en ciclos 1 al 3 del modelo WAM (WAMDIG 1988)
 - El segundo basado en Tolman y Chalikov (1996)
- Sólo para propósitos de investigación, incluye una opción de interacción no lineal completa.
- Incluye la actualización dinámica de cobertura de hielo
- Está preparado para la asimilación de datos², pero no se proporciona el paquete de asimilación de datos

1.8.2. Características numéricas

- Está escrito en la norma ANSI FORTRAN 90 completamente modular.
- Usa una malla regularmente espaciada en longitud-latitud (incrementos en longitud no necesariamente debe ser igual al incremento en latitud), o malla cartesiana similar.
- Los espectros están discretizados usando un incremento direccional constante (que abarca todo el círculo) y una malla de número de onda que varía espacialmente.
 - Esta última corresponde a una malla de frecuencias intrínsecas invariantes logarítmicas (Tolman y Booij 1998).
- Tanto un sistema numérico preciso de primer orden como uno de tercer orden están disponibles para describir la propagación de las olas (Tolman 1995). El sistema de propagación es seleccionado en el nivel de compilación.
- Los términos fuente se integran en el tiempo usando un algoritmo de intensificación dinámicamente ajustado en el tiempo, el cual concentra los esfuerzos computacionales en condiciones con rápido cambio espectral (Tolman 1992, 1997, 1999).
- El modelo, opcionalmente, puede ser compilado para incluir los paralelismos de memoria compartida utilizando las directivas del compilador OpenMP.
- El modelo puede, opcionalmente, ser compilado para un entorno de memoria distribuida utilizando la Message Passing Interface (MPI, consultar Tolman 2002a).

²la asimilación consiste en incorporar

1.8.3. Ecuaciones gobernantes

Las olas o las componentes del oleaje espectral en el agua con profundidad limitada y corrientes promedio distintas de cero son generalmente descritas usando varios parámetros de fase y amplitud. Los parámetros de fase son el vector número de onda \mathbf{k} , la dirección y varias frecuencias. Si los efectos de las corrientes promedio de las olas han de ser consideradas, se hace una distinción entre la frecuencia relativa o intrínseca (f , en radianes), la cual es observada en un marco de referencia fijo. La dirección es por definición perpendicular a la cresta de la onda (o componente espectral), y es igual a la dirección de \mathbf{k} . Generalmente, las escalas de variación de las profundidades y corrientes se asumen que son mucho más grandes que las de una ola individual (Tolman, 2002). Entonces la teoría cuasi uniforme (lineal) de olas puede aplicarse localmente, dando la siguiente relación de dispersión y la ecuación tipo Doppler para interrelacionar los parámetros de fase

$$\sigma^2 = gk \tanh kd \quad (1.63)$$

$$\omega = \sigma + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} \quad (1.64)$$

Donde d es la profundidad de agua promedio y \mathbf{U} es la velocidad de la corriente (promediada en profundidad y tiempo). La asunción de profundidades y corrientes que varían lentamente implica una batimetría a larga escala, para el cual la difracción de la ola puede generalmente ignorarse. La definición usual de k y ω de la función de fase de una ola o componente de ola implica que el número de crestas de ola se conserva

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \omega = 0 \quad (1.65)$$

Para olas monocromáticas, la amplitud es descrita mediante la amplitud, la altura de la ola, o la energía de la ola. Para olas irregulares originadas por el viento, la varianza de la superficie del mar es descrita usando la varianza de densidad espectral (espectro de energía). El espectro de varianza F es una función de todos los parámetros de fase independientes, es decir, $F(k, \sigma, \omega)$, y además varía en el espacio y el tiempo $F(k, \sigma, \omega; x, t)$.

La salida de WWATCH, sin embargo, consiste del más tradicional espectro de frecuencia-dirección $F(f_r, \theta)$.

La asunción de profundidades y corrientes que varían lentamente implica una batimetría a larga escala, para el cual la difracción de la ola puede generalmente ignorarse.

Sin corrientes, la varianza (energía) del paquete de ondas es una cantidad conservativa.

Con corriente no es así, debido al trabajo hecho sobre la transferencia media de momento de

las olas.

Sin embargo, la acción de las olas se conserva. Esto hace que el espectro densidad acción del oleaje sea el espectro de elección en el modelo. La propagación se describe por:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{S}{\sigma}; \quad N \equiv N(k, \theta; \vec{x}, t) \quad (1.66)$$

d/dt representa la derivada total:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x \cdot \vec{x}N \frac{\partial}{\partial k} \dot{x}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}N = \frac{S}{\sigma} \quad (1.67)$$

S el efecto neto de las fuentes y sumideros del espectro. En un modelo numérico, se necesita una forma Euleriana³ de la ecuación de balance (21). La ecuación de balance para el espectro $N(k, \theta; \vec{x}, t)$ en una malla esférica como la usada en WW3 está dada por

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi}N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda}N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k}N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (1.68)$$

Donde

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R} \quad (1.69)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi} \quad (1.70)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad (1.71)$$

R es el radio de la Tierra, λ y ϕ son la longitud y latitud, U_ϕ y U_λ son las componentes de la corriente.

El término fuente S generalmente se considera que constará de tres partes,

- término de interacción del viento y ola S_{in}
- término de interacciones no lineales ola-ola S_{nl}
- término de disipación S_{ds}

En aguas someras, se consideran las interacciones de las olas con el fondo S_{bot} . Esto define los términos fuente usados en WWATCH como

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \quad (1.72)$$

³es decir, respecto a un marco de referencia fijo

1.8.4. Aproximaciones numéricas

La ecuación de propagación representa la ecuación básica de WW3. Sin embargo, si se resuelve directamente, se produce una reducción efectiva de la resolución espectral en aguas someras. Esta pérdida de la resolución puede evitarse si la ecuación se resuelve en una malla de números de onda variable, que incorpora implícitamente los cambios del número de onda cinemáticos debido al asomeramiento.

Tal malla de número de onda corresponde a una malla de frecuencias invariante en el espacio y el tiempo. La correspondiente malla de números de onda local puede calcularse directamente de la malla de frecuencias invariante y de la relación de dispersión y por tanto se convierte en una función de la profundidad d . Para acomodar los cálculos económicos de S_{nl} , se adopta una malla de frecuencias logarítmica,

$$\sigma_{m-1} = X_\sigma \sigma_m \quad (1.73)$$

Donde m es un contador de malla discreto en el espacio k . X_σ está definido por el usuario en los archivos de entrada del programa.

Se utiliza un método de paso fraccionado para resolver la ecuación en WaveWatch. El primer paso considera las variaciones temporales de la profundidad, y los correspondientes cambios en la malla de números de onda.

Al dividir los efectos de las variaciones temporales del nivel del agua, la malla se convierte en invariante, y la profundidad en cuasi-constante para el resto de pasos fraccionarios. Otros pasos fraccionarios consideran la propagación espacial, la propagación intra-espectral (refracción) y términos fuente.

La técnica de múltiples divisiones resulta en un modelo que puede eficientemente ser vectorizado y paralelizado al mismo tiempo. El tiempo de división, además, el uso de distintos pasos de tiempo parciales o dinámicamente ajustados en los diferentes pasos fraccionales del modelo. WaveWatch hace una distinción entre 4 tamaños de paso diferentes. (Tolman, 2002, p. 26).

1. El tamaño de paso ‘global’, Δt_g , en el cual la solución entera se propaga en el tiempo, y los intervalos a los cuales son interpolados los vientos de entrada y corrientes.
2. El segundo tamaño de paso es el tamaño de paso para la propagación espacial. El usuario proporciona el tamaño de paso de propagación máximo para la frecuencia más baja del modelo $\Delta t_{p,1}$. Para la frecuencia con el contador m , el tamaño de paso máximo $\Delta t_{p,m}$ es calculado en el modelo como

$$\Delta t_{p,m} = \frac{f_m}{f_1} \Delta t_{p,1} \quad (1.74)$$

Si el tamaño de paso de propagación es menor que el tamaño de paso global, los efectos de propagación son calculados con un número de tamaños de paso sucesivos menores.

3. El tercer tamaño de paso es el de la propagación intra-espectral. Para mallas de gran escala y de aguas profundas este tamaño de paso generalmente puede tomarse igual al tamaño de paso global Δt_g . Para mallas de aguas someras, menores tamaños de paso de propagación intra-espectral permiten mayores efectos de refracción con las restricciones de estabilidad del esquema.
4. El último tamaño de paso es para la integración de los términos fuente, el cual se ajusta dinámicamente para cada punto de la malla y tamaño de paso global.

Las banderas del modelo empleadas son las que trae por omisión el modelo, las cuales son

FLDRY Corrida en seco (sólo entrada/salida, sin cálculos).

FLCX, FLCY Activar X e Y componentes de propagación.

FLCTH, FLCK Activar cambio de dirección y número de onda.

FLSOU Activar términos fuente.

1.8.5. Opciones de salida

- Campos cuadrículados de 18 parámetros de entrada y promedios de ola tales como la altura significativa de la ola, direcciones, frecuencias, etc.
- Salida de espectros en lugares seleccionados
- Salida de espectros a lo largo de pistas arbitrarias
- Archivos con datos de frontera de hasta 9 corridas anidadas separadas
- El modelo proporciona salidas en binario o ASCII, así como la salida para el paquete gráfico GrADS por medio de post procesamiento

Los campos cuadrículados son Tolman (2002):

1. La profundidad media del agua (en metros)
2. La velocidad promedio de la corriente (vector, en m/s)
3. La rapidez media del viento (vector, m/s). Esta rapidez del viento siempre es la rapidez del viento de entrada al modelo, es decir, no está corregida por la rapidez de la corriente.
4. La diferencia de temperatura del aire de la atmósfera y el agua del mar.
5. La velocidad de fricción u_* (escalar). La definición depende de la parametrización del término fuente seleccionado (m/s).

6. Altura de ola significativa (m)

$$H_s = 4\sqrt{E} \quad (1.75)$$

7. Longitud promedio de la ola

$$L_m = 2\pi\overline{k^{-1}} \quad (1.76)$$

8. Período promedio de la ola (s)

$$T_m = 2\pi\overline{\sigma^{-1}} \quad (1.77)$$

9. Dirección promedio de la ola (grados sexagesimales, convención meteorológica)

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (1.78)$$

1.8.6. Por qué usar Wavewatch III

Se decidió usar Wavewatch debido a que es un modelo numérico que se encuentra operativo en la agencia estadounidense de la NOAA, entendiéndose por operativo, que genera pronósticos de oleaje a intervalos de 3 horas para los próximos 7 días, se retro-alimenta con datos de viento del modelo GFS. Un ejemplo de las salidas del modelo operativo es el mapa que se muestra en la figura 1.6 obtenida del modelo operativo en la NOAA para la fecha y hora especificada..

El modelo corre de manera operativa todos los días y también genera información de oleaje haciendo corridas en mallas anidadas con una resolución mas fina que la del modelo global, como la de la figura 1.7 obtenida del modelo operativo en la NOAA para la fecha y hora especificada, en la que se muestra la región del Océano Atlántico.

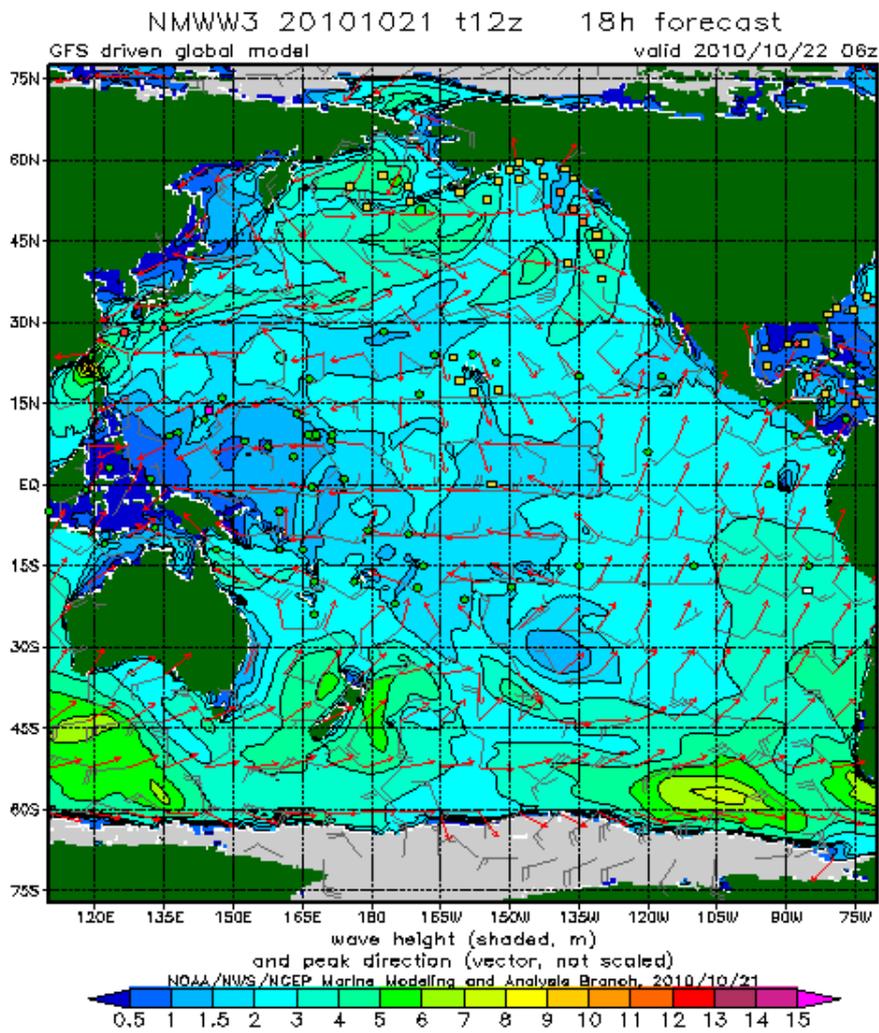


Figura 1.6: Mapa del Océano Pacífico de altura significativa del oleaje.

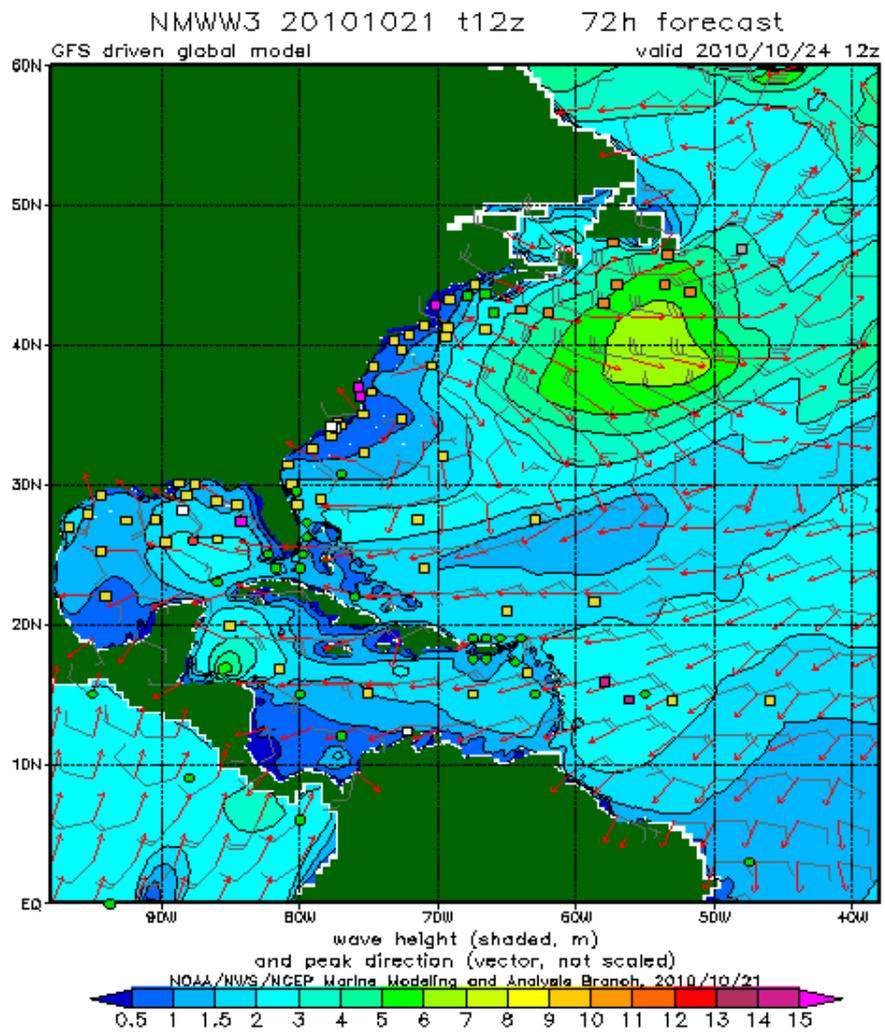


Figura 1.7: Mapa del Océano Atlántico de altura significativa del oleaje.

Capítulo 2

Metodología

EN el presente capítulo se describe el proceso necesario para la instalación del modelo Wavewatch en una computadora de escritorio modesta, así como algunas consideraciones en caso de hacerlo funcionar en una computadora con procesador multinúcleo. También se describe el uso de los distintos interruptores disponibles para obtener distintos dependiendo de los resultados que se desean obtener. Se explica una descripción de los datos de entrada necesarios para echar a andar Wavewatch, las condiciones iniciales dadas, las opciones de salida entre otros.

2.1. Instalación de Wavewatch III

2.1.1. Consideraciones previas

SE instaló el código fuente del modelo escrito en lenguaje Fortran 90 en una estación de trabajo SUN con sistema operativo Solaris, usando el compilador de Fortran 90 para Solaris. Para instalarlo se emplean rutinas escritas en lenguaje C, por lo que de igual manera se requirió el uso del compilador CC para Solaris. Como paso adicional, agregar el directorio que contiene los enlaces a los compiladores (en una instalación normal se ubican en /opt/sunstudio12.1/bin) al archivo de usuario con las variables entorno *.dtprofile*, que en el caso del sistema operativo Solaris, se encuentra en el directorio raíz o root (/), si no existe, crearlo mediante un archivo vacío.

Así mismo se necesita haber instalado el software de compiladores con las librerías y aplicaciones para desarrollo de código libre que acompañan al sistema operativo Solaris, el llamado Solaris 10 OS Companion Software CD.

También se requiere que la ruta completa al comando 'make' esté agregada a la variable de

entorno del sistema \$PATH , lo cual se hace agregando la línea `export PATH= $PATH : /usr/ccs/bin` al archivo `.dtprofile` ubicado en el directorio raíz del sistema (/). La utilidad `make` de UNIX debe estar instalada en nuestro sistema operativo, ya que es utilizada para compilar y vincular los programas; de la misma forma, si no se encuentra en el sistema base, ubicarlo en el sistema o instalarlo si no se encuentra, y agregar su ubicación a la variable de entorno \$MAKE dentro del archivo `.dtprofile`.

2.1.2. Procedimiento de instalación

Para la instalación del modelo, Wavewatch trae consigo una rutina de instalación, el cual nos pregunta los compiladores a usar, dónde instalar, directorio para archivos temporales, entre otros; estas opciones se establecen ejecutando el archivo `install_wwatch3`

A continuación se introdujeron algunos cambios en el código fuente del modelo numérico, todos se encuentran disponibles en la página en internet de Wavewatch-III en la sección de “errata”. Editar el archivo `ad3` y `link`, ubicados en `/WW3/bin`, buscar las líneas correspondientes a

```
if [ -n "`grep MPI $main_dir/bin/switch`" ]
then
  export mpi_mod='yes'
else
  export mpi_mod='no'
fi

if [ -n "`grep OMP $main_dir/bin/switch`" ]
then
  export omp_mod='yes'
else
  export omp_mod='no'
fi
```

y cambiarlas por:

```
if [ -n "`grep MPI $main_dir/bin/switch`" ]
then
  mpi_mod='yes'
else
  mpi_mod='no'
fi
export mpi_mod
```

```

if [ -n "`grep OMP $main_dir/bin/switch`" ]
then
  omp_mod='yes'
else
  omp_mod='no'
fi
export omp_mod

```

Esto se debe a que algunas implementaciones de `/bin/sh` no permiten la asignación simultánea y exportar estas variables, y dará errores en tiempo de ejecución.

Reemplazar la línea 849 en el archivo `w3iogomd.ftn` de la carpeta `ftn` en la subrutina `W3IOGO`, donde literalmente dice

```

IF ( MAPSTA(IY,IX) .GT. 0 ) THEN
  AUX1(ISEA) = UST(ISEA) * ASF(ISEA)
ELSE
  AUX1(ISEA) = UNDEF
END IF

```

sustituir por

```

!/ST1          IF ( MAPSTA(IY,IX) .GT. 0 ) THEN
!/ST2          IF ( MAPSTA(IY,IX) .EQ. 1 ) THEN
                AUX1(ISEA) = UST(ISEA) * ASF(ISEA)
                ELSE
                AUX1(ISEA) = UNDEF
                END IF

```

Esto debe hacerse cuando se elija la opción para término fuente de Tolman y Chalikov, ya que las velocidades de fricción en los puntos de frontera activos adquieren valores negativos muy grandes, en vez de indefinirse.

Editar el archivo `w3fldsmd.ftn` ubicado en la carpeta `ftn` y en las líneas 1785 a 1789, en la lista de parámetros de la subrutina `W3FLDH`, algunos arreglos están declarados erróneamente:

```

INTEGER, INTENT(INOUT)  :: NH, THO(2,3,NHM), TF0(2), TFN(2)
INTEGER, INTENT(OUT)    :: IERR
REAL, INTENT(INOUT)     :: HA(NHM,3), HD(NHM,3), HS(NHM,3),      &
                          FX0(MX,MY), FY0(MX,MY), FS0(MX,MY),    &
                          FXN(MX,MY), FYN(MX,MY), FSN(MX,MY)

```

cambiarlas por

```

INTEGER, INTENT (INOUT)  :: NH, THO (2,4,NHM), TF0 (2), TFN (2)
INTEGER, INTENT (OUT)    :: IERR
REAL, INTENT (INOUT)     :: HA (NHM,4), HD (NHM,4), HS (NHM,4),      &
                           FX0 (MX,MY), FY0 (MX,MY), FS0 (MX,MY),    &
                           FXN (MX,MY), FYN (MX,MY), FSN (MX,MY)

```

Finalmente, el arreglo MAPSTA en la rutina W3PXYP3 en el archivo *w3pro3md.ftn* se sale de los límites en la sección 3.a.2. Para corregir esto, se agrega la declaración de la variable JXY en las líneas 692 y 693

```

INTEGER      :: IY, IXC, IYC, IIXY1 (NY), IIXY2 (NY), &
              IIXY3 (NY), IIXY4 (NY), JXY

```

Además, la sección 3.a.2, desde la línea 882 hasta la 995 requiere nueve cambios, el código final debe lucir así:

```

!
! 3.a.2 Near-coast points
!
      DO IP=NCENT+1, NSEA
          ISEA = MAPCXY (IP)
          IXY  = MAPSF (ISEA,3)
          JXY  = IXY - 1 + NY*NX
          IY   = MAPSF (ISEA,2)
          RD1  = RDI1 (IY)
          RD3  = RDI3 (IY)
          IF ( MAPTRN (IXY) ) THEN
              VQ (IXY) = AQ (IXY)
          ELSE
              RD2 = MIN ( 1. , RDI2 (IY) * CG (IK, ISEA) )
              RD4 = MIN ( 1. , RDI4 (IY) * CG (IK, ISEA) )
              VQ (IXY) = VQ (IXY) &
                        + AQ (IXY) * (3.-RD2-RD4)/3.
              IF ( MAPSTA (1+MOD (JXY+IIXY1 (IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
                  VQ (IXY+IIXY1 (IY)) = VQ (IXY+IIXY1 (IY)) &
                    + AQ (IXY) * RD2*RD1/6.
              ELSE
                  VQ (IXY) = VQ (IXY) &
                    + AQ (IXY) * RD2*RD1/6.
              END IF
          END IF
      END DO

```

```

IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY+IIXY2(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY+IIXY2(IY)) = VQ(IXY+IIXY2(IY))          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD1)*RD2/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD1)*RD2/6.
END IF
IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY+IIXY3(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY+IIXY3(IY)) = VQ(IXY+IIXY3(IY))          &
                        + AQ(IXY) * RD4*RD3/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * RD4*RD3/6.
END IF
IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY+IIXY4(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY+IIXY4(IY)) = VQ(IXY+IIXY4(IY))          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD3)*RD4/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD3)*RD4/6.
END IF
IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY-IIXY1(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY-IIXY1(IY)) = VQ(IXY-IIXY1(IY))          &
                        + AQ(IXY) * RD2*RD1/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * RD2*RD1/6.
END IF
IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY-IIXY2(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY-IIXY2(IY)) = VQ(IXY-IIXY2(IY))          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD1)*RD2/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * (1.-RD1)*RD2/6.
END IF
IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY-IIXY3(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
    VQ(IXY-IIXY3(IY)) = VQ(IXY-IIXY3(IY))          &
                        + AQ(IXY) * RD4*RD3/6.
ELSE
    VQ(IXY          ) = VQ(IXY          )          &
                        + AQ(IXY) * RD4*RD3/6.

```

```

        END IF
    IF ( MAPSTA(1+MOD(JXY-IIXY4(IY),NX*NY)) .EQ. 1 ) THEN
        VQ(IXY-IIXY4(IY)) = VQ(IXY-IIXY4(IY))      &
            + AQ(IXY) * (1.-RD3)*RD4/6.
    ELSE
        VQ(IXY      ) = VQ(IXY      )      &
            + AQ(IXY) * (1.-RD3)*RD4/6.
    END IF
END IF
END IF
END DO

```

Abrir los archivos *comp* y *link* con un editor de texto. En el archivo *comp*, en la sección del compilador escribir `f90 -fast -moddir=$path_m -c $name. $fext`, suprimir ‘`$name out 2 > $name.err`’. En el archivo *link*, en la sección del compilador agregar `f90 -fast -o $prog $objects > link.out 2 > link.err`. En ambos archivos desmarcar la opción `OK="$?"`.

Buscar el archivo *w3_make* en la carpeta *bin* y editarlo; en la sección 1.e comentar `rm -f *.f *.f90` y `rm -f *.l`; esto para que no remueva los archivos del código fuente; guardar los cambios. Desde una ventana de terminal, ir al directorio donde se instaló WW3 y ubicados en la carpeta *bin*, ejecutar *w3_make*. Tras algunos mensajes de advertencias, y luego de ejecutar dos veces mas el comando *w3_make* para compilar y vincular de manera correcta, la instalación de WW3 estará completa.

Se realizaron las pruebas que sugiere el manual del usuario para comprobar una instalación exitosa obteniéndose los resultados esperados. Estas son principalmente para comprobar que los interruptores funcionen adecuadamente, dichos archivos se encuentran en el archivo *wwatch3.tst.tar*; incluye los scripts necesarios para correr el modelo y los archivos de salida que se deben obtener para comparar entre sí.

2.1.3. Consideraciones adicionales

El modelo numérico WW3 también puede instalarse en un equipo informático multiprocesador de memoria compartida o memoria distribuida, para el primer caso, el cual se utilizó en una estación de trabajo con las siguientes características:

- Un procesador Intel de 4 núcleos 2.66GHz, 4MB de caché nivel 2.
- 6GB de memoria RAM DDR2 800MHz
- Almacenamiento en disco duro de 1.5TB

- Sistema Operativo Linux

Para el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles es necesario cambiar algunos elementos en el código del modelo, a saber:

Compilacion serie Primero debe generarse una versión “en serie” de todos los programas del modelo

Interruptor OMP0 Agregarlo al archivo de interruptores *switch* del modelo para habilitar la paralelización del modelo usando las directivas OpenMP, también conocidas como ‘hilado’¹.

Bandera -fopenmp del compilador Añadir la bandera de compilación -fopenmp a las opciones del compilador f90 en los archivos *comp* y *link*

Compilación paralela Una vez generada la versión serie del modelo y agregadas las opciones que permiten el uso de un ambiente paralelo, recompilar, pero esta vez, sólo compilando el programa principal que se encarga de las propagaciones *ww3_shel*, es decir, correr *w3_make ww3_shel* en una terminal. El código del programa *ww3_shel* es el único que contiene líneas de código especializadas para realizar cálculos de forma paralela.

2.2. Uso de WW3

Es necesario crear un script para correr el modelo, se puede tomar como base unos de los casos de prueba, ubicados en la carpeta *../test*. En el script es necesario definir el archivo de batimetría, obstáculos, transparencias (todos mallas), archivo con los campos de viento, tiempo de corrida y opciones de salida.

Para usar el modelo con campos de viento no homogéneos se utilizaron los interruptores por omisión del archivo *switch* incluyendo el esquema de propagación Ultimate Quickest PR3 con la técnica de promediado de Tolman. Cualquier modificación hecha al archivo *switch* requiere una recompilación de todo el modelo. Los interruptores por omisión son:

F90 fecha, captura de tiempo y cancelación de programa estilo FORTRAN-90

SHRD modelo de memoria compartida

LRB4 longitud de palabras de 4-bytes

¹*threading*, en inglés

LLG malla esférica

PR3 esquema de propagación ULTIMATE QUICKEST con la técnica de promediado de Tolman

ST2 paquete de términos fuente de entrada atmosférica y disipación de Tolman y Chalikov (1996)

NL1 aproximación de las interacciones no lineales por métodos discretos (DIA)

BT1 formulación de la fricción por fondo tipo JONSWAP

WND1 método de interpolación lineal de los datos de viento de entrada para que coincidan con los nodos de la malla

o0 Salida de las listas de nombres en el preprocesador de la malla

o1 Salida de los puntos de frontera en el preprocesador de la malla.

o2 Salida del mapa de estado de la malla de puntos en el preprocesador de malla

o2a Generación de archivo de máscara tierra-mar *mask.ww3* en el preprocesador de mallas.

o2b Salida del mapa de obstrucciones en el preprocesador de mallas

o3 Salida adicional en ciclos sobre campos en el preprocesador de mallas.

o4 Graficar los espectros de energía unidimensionales en el programa de condiciones iniciales.

o5 Identificador del espectro de energía bidimensional

o6 Identificador de la distribución espacial de alturas de ola (no adaptado para sistemas de memoria distribuida)

o7 Presenta los datos de entrada para los campos homogéneos en la terminal genérica desde la cual se corre el modelo.

Los demás archivos de batimetría, obstáculos, viento y máscara si los hubieren, deben estar ubicados en la carpeta temporal (../tmp) creada al momento de instalar WW3.

Se emplean 25 frecuencias, con una frecuencia inicial de 0.04177Hz con incrementos de 1.1Hz y en 24 direcciones, esto es a 15 grados contados desde el norte en sentido horario, es decir empleando la convención meteorológica.

Los intervalos de tiempo globales, CFL², refracción y términos fuente usados son 3600 1300 3600 y 300, respectivamente, todos en segundos.

El esquema de propagación utilizado es la técnica de promediado de Tolman (Ultimate Quickest). El aporte de viento utilizado es el de Tolman y Chalikov (1996).

2.3. Datos de entrada

SE procedió a introducir velocidades de viento, para la malla global, siendo las componentes de la velocidad, U y V, donde U es la componente en la dirección horizontal (positiva hacia el este), y V, la componente vertical en la dirección norte (positiva hacia el norte).

Los datos deben ser matrices y contenidas en un mismo archivo, de texto por ejemplo; con el siguiente formato secuencial:

YYYYMMDD HHMMSS

Matriz U

Matriz V

YYYYMMDD HHMMSS

Matriz U

Matriz V

y así sucesivamente.

El archivo con los campos de viento puede ser creado con Matlab® mediante una rutina que lea archivos en formato NetCDF³ o con un script escrito en lenguaje shell para sistemas UNIX. Se optó por trabajar en Matlab y se creó la rutina reanalysisnc wind.m (Ver Apéndice 1)

Los campos de viento empleados se extrajeron de la base de datos de reanálisis de la NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) con una resolución espacial en el dominio global desde los 0°E a 358.125°E grados en longitud y desde los -88.542°S hasta los 88.542°N grados de latitud, lo que hace una malla (matriz) de 192x94 nodos, los nodos en longitud están separados a 1.875° grados y en latitud es variable, más espaciados cerca del Ecuador y menos espaciados cerca de los polos, (ver figura 2.1). La base contiene los datos a intervalos de tiempo de 6 horas (4 datos diarios). Con valores del

²Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) number, definido como $\mu = C_{gx}\Delta t/\Delta x$, el cual es una cantidad sin dimensiones y cuantifica el número de espacios de la malla atravesados por un paquete de energía en un tamaño de paso dado. (Cavaleri et al., 2007, p. 648)

³Network Common Data Form es un conjunto de librerías de software libre y formatos de datos multiplataforma (independientes de la arquitectura del computador) que soportan la creación, acceso, y distribución de datos científicos orientados en arreglos.

campo de viento en un rango desde -30m/s hasta 30m/s aproximadamente, dependiendo del año. Contiene otra información relevante:

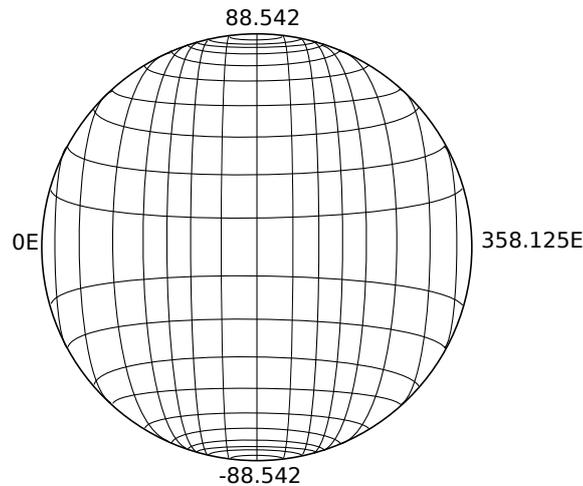


Figura 2.1: Representación de la malla global que contiene los datos en formato NetCDF

- Offset = 225.45
- Factor de escala = 0.01
- Rango válido = -102.2, 102.2
- Rango real = -29.2, 28.5
- Valor no establecido = 32766

Debido a la irregularidad espacial de la matriz de datos es necesaria la interpolación previa a una malla regular (igualmente espaciada) con el fin de hacer más fácil la introducción de los parámetros que definen los archivos de entrada para el modelo. Esta se realiza empleando el software Matlab, incorporando la función de interpolación lineal al código; escrito previamente para extraer los datos de los archivos de la base de datos de reanálisis. Se deja que WaveWatch-III haga una interpolación para cada nodo de la malla de batimetría, el usuario puede elegir entre una lineal o una cuadrática, que puede realizarse desde Matlab pero por el gran volumen de información exige una gran cantidad de memoria RAM del sistema para almacenar las variables, por lo cual se hace una interpolación cercana a la malla original de vientos, además, la realizada por WW3 es más eficiente y rápida que la realizada por Matlab.

La rutina, además de extraer, grafica los datos de viento, mostrándolos como el de la figura 2.2), estos fueron extraídos del archivo de reanálisis con la rutina para Matlab, para la fecha y hora

indicadas. Posterior se escriben las matrices a un archivo de texto en el formato que WW3 lee como entrada, descrito anteriormente.

La batimetría empleada es la global que se encuentra a disposición en el sitio oficial de la NOAA⁴ donde WW3 funciona de manera operacional; con resolución de 1.25x1 grados en longitud y latitud respectivamente, lo que representa una malla computacional de 2kmx1.6Km aproximadamente.

La nueva versión de Wavewatch III 3.14 trae consigo un paquete para Matlab con el que pueden crearse mallas batimétricas personalizadas, empleando información de Etopo2⁵

A continuación se muestra un ejemplo de uno de los archivos de entrada que se le suministra al modelo para que lleve a cabo las simulaciones.

```
cat > ww3_grid.inp << EOF
$ WAVEWATCH III Grid preprocessor input file
$ -----
  'NWW3 global 1x1.25 degr.'
$
  1.1  0.04177  25  24
$
  F T T T F T
$
  3600. 1300. 3600.  300.
$
  &SBT1 GAMMA = -0.038 /
  &MISC FLAGTR = 4, CICE0 = 0.33, CICE1 = 0.67 /
END OF NAMELISTS
$
  288      157
    1.25    1.00    1.00
    0.00  -78.00    1.00
$
```

⁴La National Oceanic and Atmospheric Administration es una agencia federal estadounidense enfocada en la condición de los océanos y la atmósfera

⁵datos procedentes de satélite con información topográfica y batimétrica del mundo entero, con resolución espacial de 2 minutos de arco: ETOPO2v2 Global Gridded 2-minute Database, National Geophysical Data Center, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Dept. of Commerce, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>.

```

-0.05  25.00  11  -0.1  1  1  '(...)'  'NAME'  'nww3.bot'
          12  0.001  1  1  '(...)'  'NAME'  'nww3.obs'
$
    0    0    F
$
$ AKW model boundary conditions
$ bot_1
$  160.00   54.25  0.00 -0.25   37
$  160.00   45.00  0.50  0.00  153
$ bot_2
    160.00   53.00  0.00 -0.25   32
    160.00   45.00  0.50  0.00  153
$
$ WNA/NAH model boundary conditions
$ bot_1
$  310.25    0.00  0.25  0.00  -79
$  330.00    0.00  0.00  0.25  201
$  329.75   50.00 -0.25  0.00  104
$ bot_2
    310.75    0.00  0.25  0.00  -77
    330.00    0.00  0.00  0.25  201
    329.75   50.00 -0.25  0.00  102
$
$ ENP model boundary conditions
    190.00    5.00  0.25  0.00 -371
    190.00    5.25  0.00  0.25  190
    190.50   52.75  0.25  0.00    2
    194.00   54.00  0.25  0.00    1
    194.75   54.50  0.25  0.00    2
$
    0.      0.      0.      0.      0
$
$ End of input file
EOF

```

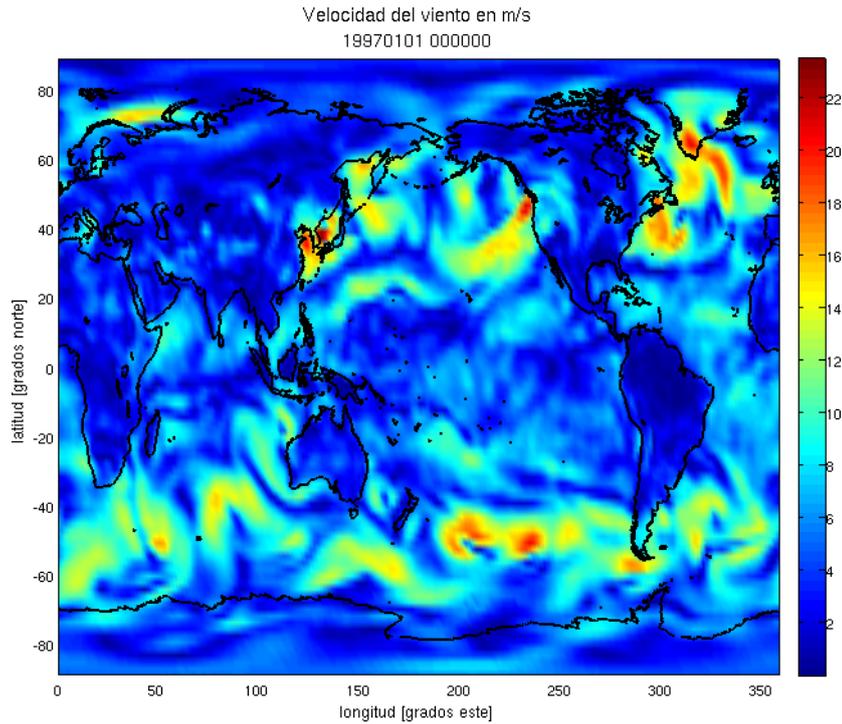


Figura 2.2: Visualización del campo de viento en el dominio global

2.3.1. Condiciones iniciales

Las condiciones inicial pueden ser, ya sea asumiendo un espectro del tipo JONSWAP con una distribución direccional o para un fetch limitado; o bien un espectro gaussiano para cada nodo de la malla computacional. El modelo también permite iniciar “en frío” asumiendo condiciones de oleaje cero o condiciones “calmas”. Asi como definir un espectro personalizado.

```
cat > ww3_strt.inp << EOF
$ WAVEWATCH III Initial conditions input file
$ -----
  3
$
EOF
echo "  Screen ouput routed to $path_o/ww3_strt.out"
$path_e/ww3_strt > $path_o/ww3_strt.out
rm -f ww3_strt.inp
```

2.3.2. Opciones de salida

Se pide salida de los siguientes parámetros: profundidad promedio, velocidad promedio del viento, velocidad de fricción, altura significativa, longitud de onda, período, dirección, propagación direccional, frecuencia y dirección pico, frecuencia pico de la parte del mar local del espectro, dirección del mar local y tamaño de paso promedio en el término fuente, frecuencia de corte, como puede verse a continuación.

```
# 3. Main program -----
echo ' '
echo '+-----+'
echo '|      Main program      |'
echo '+-----+'
echo ' '
cat > ww3_shel.inp << EOF
$ WAVEWATCH III shell input file
$ -----
  F T
  F T
  T F
  F
  F
  F
  F
$
19970101 000000
19971231 000000
$
19970101 000000 10800 19971231 000000
  T F T F T  T T T T T  T T T T T  T F F
$
19970101 000000 10800 19971231 000000
 268.75  13.00 'Guate'
 270.00  13.00 'Acajut'
 271.25  13.00 'LaPaz'
 272.50  12.00 'LaUnion'
```

```

0.0    0.0  'STOPSTRING'
$
19970101 000000      0 19970101 000000
19970101 000000  86400 19971231 000000
19970101 000000      0 19971231 000000
EOF

```

No se piden datos de frontera pero sí archivos de reinicio (restart) a intervalos de 48 horas a partir del segundo día de cálculos.

Tomando en cuenta las dimensiones de la malla computacional, se analizan los nodos de la malla y se eligieron los más cercanos a la cosa salvadoreña, los cuales son dos, uno con coordenadas geográficas 13°Norte, 90°Oeste y el otro nodo de coordenadas 13°Norte, 88.75°Oeste.

2.3.3. Trabajo adicional

Se corrió el modelo en su última versión 3.14, empleando campos de viento obtenidos del modelo GFS⁶, los cuales son las magnitudes de los mismos como predicciones a intervalos de 3 horas para fechas específicas, dichos campos son los empleados por WW3 cuando funciona de manera operativa en servidores de la NOAA. La diferencia entre la base de datos GFS y reanálisis (NCEP), radica en que los de GFS son predicciones a partir de observaciones de estaciones meteorológicas, en cambio los de reanálisis son asimilaciones procedentes de mediciones de anemómetros colocados en boyas, barcos, observaciones de satélite y predicciones en un mayor rango de años, luego estos datos se promedian y se elaboran mallas. Los datos de reanálisis están organizados en una matriz espacial regular, con diferente espaciamiento en latitud que en longitud. Los datos GFS tienen mejor resolución espacial que los NCEP.

Fue necesaria la implementación de otra rutina en Matlab para leer los archivos GFS almacenados en formato grib. La rutina se encuentra anexada en el Apéndice 2.

Se hicieron corridas para los años desde febrero de 1997 a agosto 2010 (haciendo un total de 13 años y 7 meses). Se contrastó la salida del año 1997 con GFS contra las salidas obtenidas empleando la base de datos de reanálisis (NCEP).

⁶Global Forecast System, de la NOAA

Capítulo 3

Resultados y Análisis

EN el presente capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos de la modelación, la interpretación se hizo valiéndose de herramientas estadísticas. Para el procesamiento de las series de datos se utilizó MATLAB, para ello se elaboraron códigos que pudiesen leer la información y luego poder trabajar con ellos.

Se corrió el modelo empleando datos de viento de 14 días, (hindcast¹) en los cuales no se obtienen los mismos resultados comparados con las salidas de las corridas del WW3 operacional en la NOAA para dichos nodos. Es lo que técnicamente se conoce como tiempo de “calentamiento” del modelo numérico. Se volvió a correr empleando datos de 45 días. A partir de la segunda y tercera semana se observan valores de altura significativa, período y dirección similares a los del modelo operacional en la NOAA. Se volvió a correr nuevamente, pero empleando datos de todo el año 1997.

3.1. Características del oleaje

Se generan espectros direccionales del oleaje con el paquete adicional GrADS² para ambos nodos a intervalos de tiempo de 3 horas (figura 3.4) y en Matlab leyendo los archivos .spc en formato ascii, usando una rutina obtenida del servidor de IFREMER³ para generar gráficos como el de la figura 3.1, posteriormente se obtiene un espectro direccional en coordenadas polares (ver

¹Retrospectiva

²Grid Analysis and Display System es una herramienta de escritorio interactiva que es usada para el fácil acceso, manipulación y visualización de datos de ciencias de la tierra. El formato de los datos puede ser ya sea binario, GRIB, NetCDF, o HDF-SDS (Scientific Data Sets). Usa un ambiente de datos de 4-Dimensiones: longitud, latitud, nivel vertical, y tiempo. Las operaciones son ejecutadas interactivamente introduciendo expresiones tipo FORTRAN en la línea de comandos.

³Institut Francais de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, <ftp://ftp.ifremer.fr/>

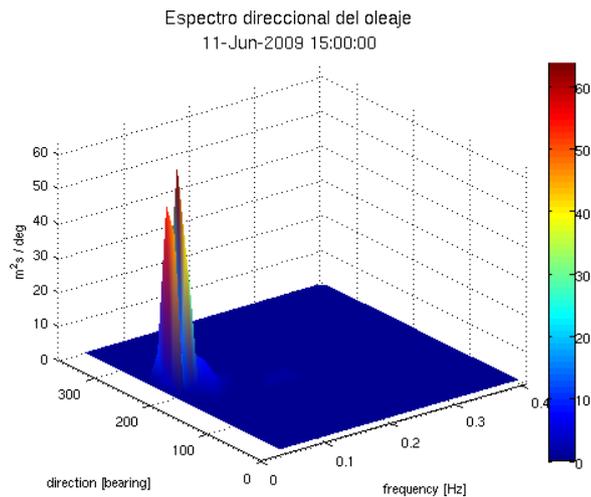


Figura 3.1: espectro direccional

figura 3.2) empleando el paquete DIWASP⁴ y finalmente empleando otra rutina de IFREMER se obtiene el espectro unidireccional en frecuencias (ver figura 3.3) el cual hace la integración del espectro previo en todas las direcciones.

Mediante otra rutina es posible calcular parámetros importantes del oleaje, como lo son, la altura significativa y período de la componente más energética, que puede deberse a mar local o mar de leva, pero no calcula ambas a la vez.

Las magnitudes de las variables modeladas, por ejemplo, el de la figura 3.5 muestra la variabilidad de la magnitud altura significativa del oleaje para el año 1997, se grafican mediante una rutina escrita en MATLAB.

Del mismo modo, la figura 3.6 representa la variabilidad de la dirección del oleaje según la salida del modelo WW3 para el año 1997 en el nodo 13N 88.75W de la malla.

Corrido el modelo numérico en las versiones 2.22 y 3.14, se decidió correr con la última versión, ya que introduce mejoras notables en la salida del modelo, no hay necesidad de incorporar modificaciones en el código fuente y las salidas son más cercanas a la base de datos de comparación que se dispone, obtenida a través del sitio Buoyweather⁵.

Se generaron salidas en malla del Océano Pacífico frente a la costa centroamericana (figuras 3.7 y 3.8), así como salidas globales, para las magnitudes altura significativa (figura 3.9, período y dirección.

⁴es una caja de herramientas de funciones de MATLAB para la estimación de espectros direccionales de olas a partir de datos de campo <http://www.metocean.co.nz/cms/software>

⁵<http://www.buoyweather.com/>

Espectro direccional del oleaje en coordenadas polares
11-Jun-2009 15:00:00

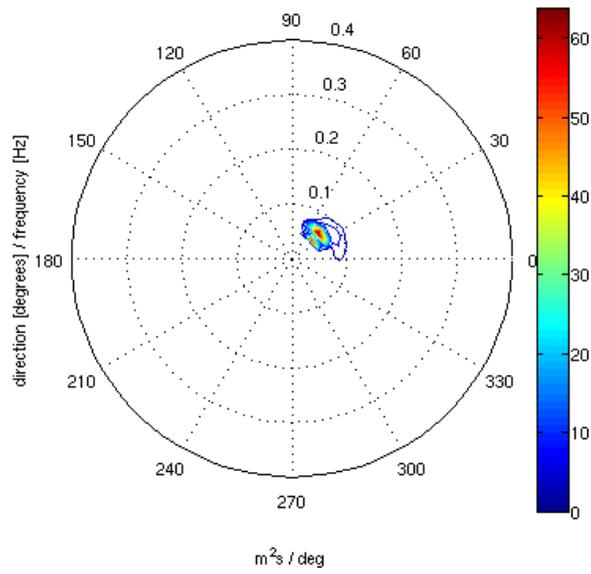


Figura 3.2: Espectro direccional del oleaje para la fecha y hora establecida

Espectro unidireccional del oleaje
11-Jun-2009 15:00:00

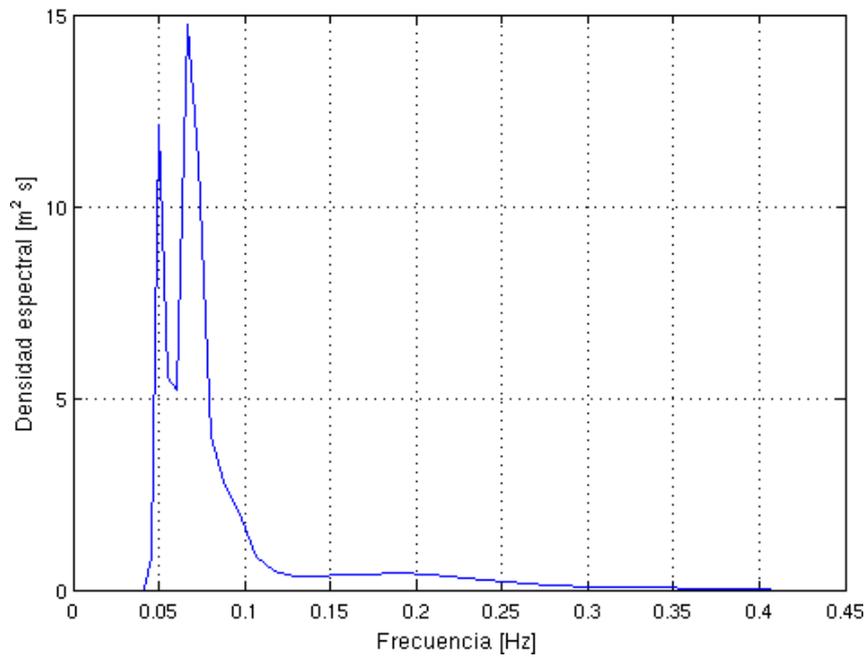


Figura 3.3: Espectro unidireccional del oleaje para la fecha y hora establecida

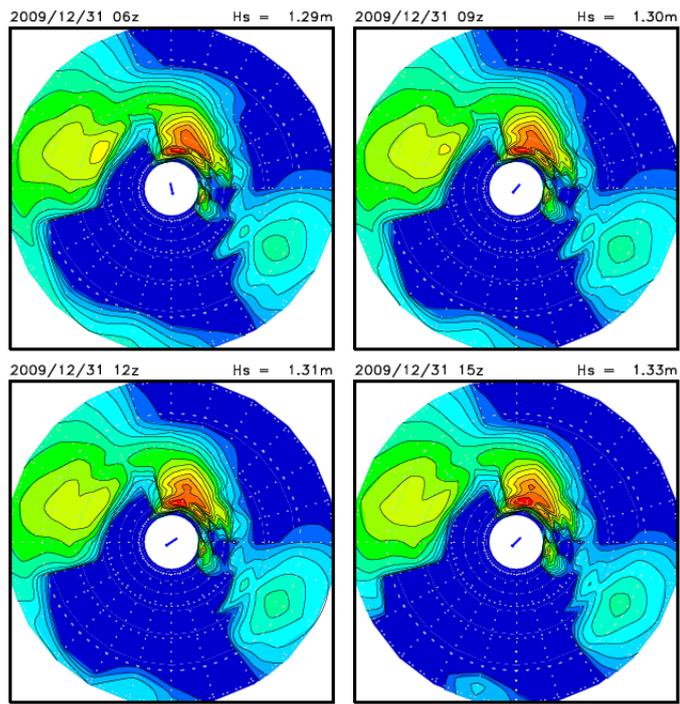


Figura 3.4: Espectros direccionales del oleaje cada 3 horas.

Altura significativa del oleaje. Año 1997
Nodo 13N 88.75W

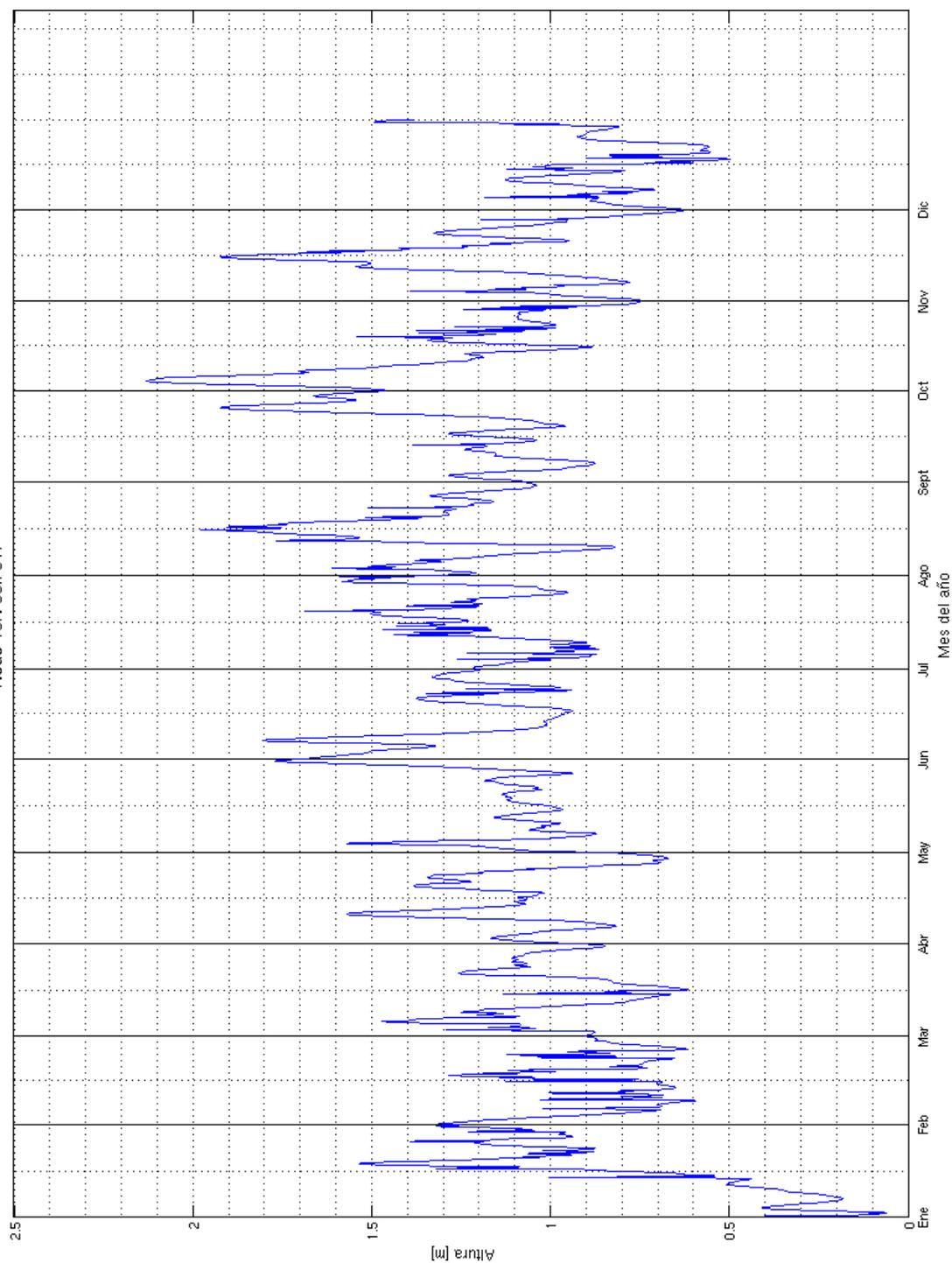


Figura 3.5: Variabilidad de la altura significativa del oleaje a partir de datos modelados con WW3 para el año 1997 en el nodo 13N 88.75W

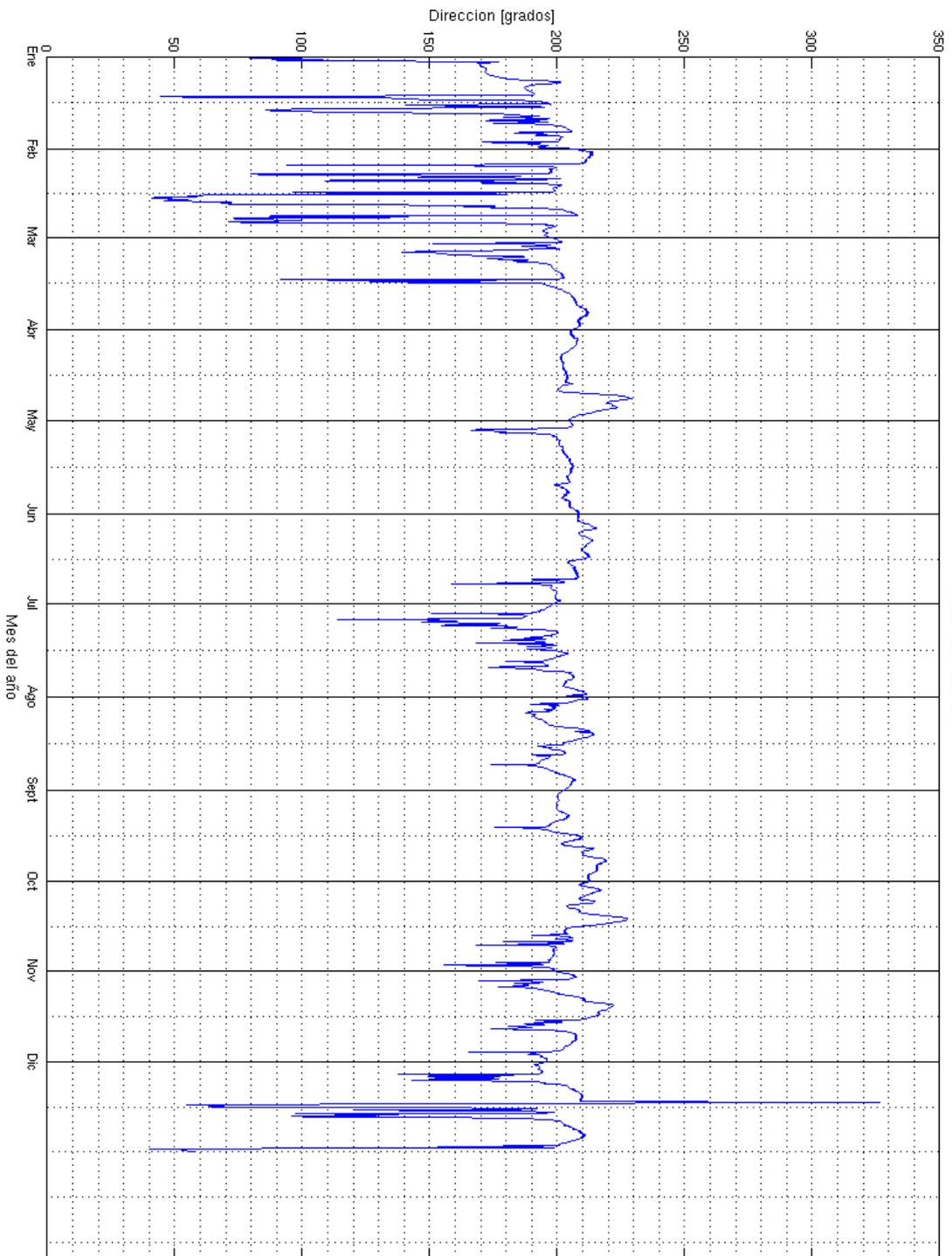


Figura 3.6: Dirección principal del oleaje modelada con WW3. Nodo 13N 88.75W, año 1997

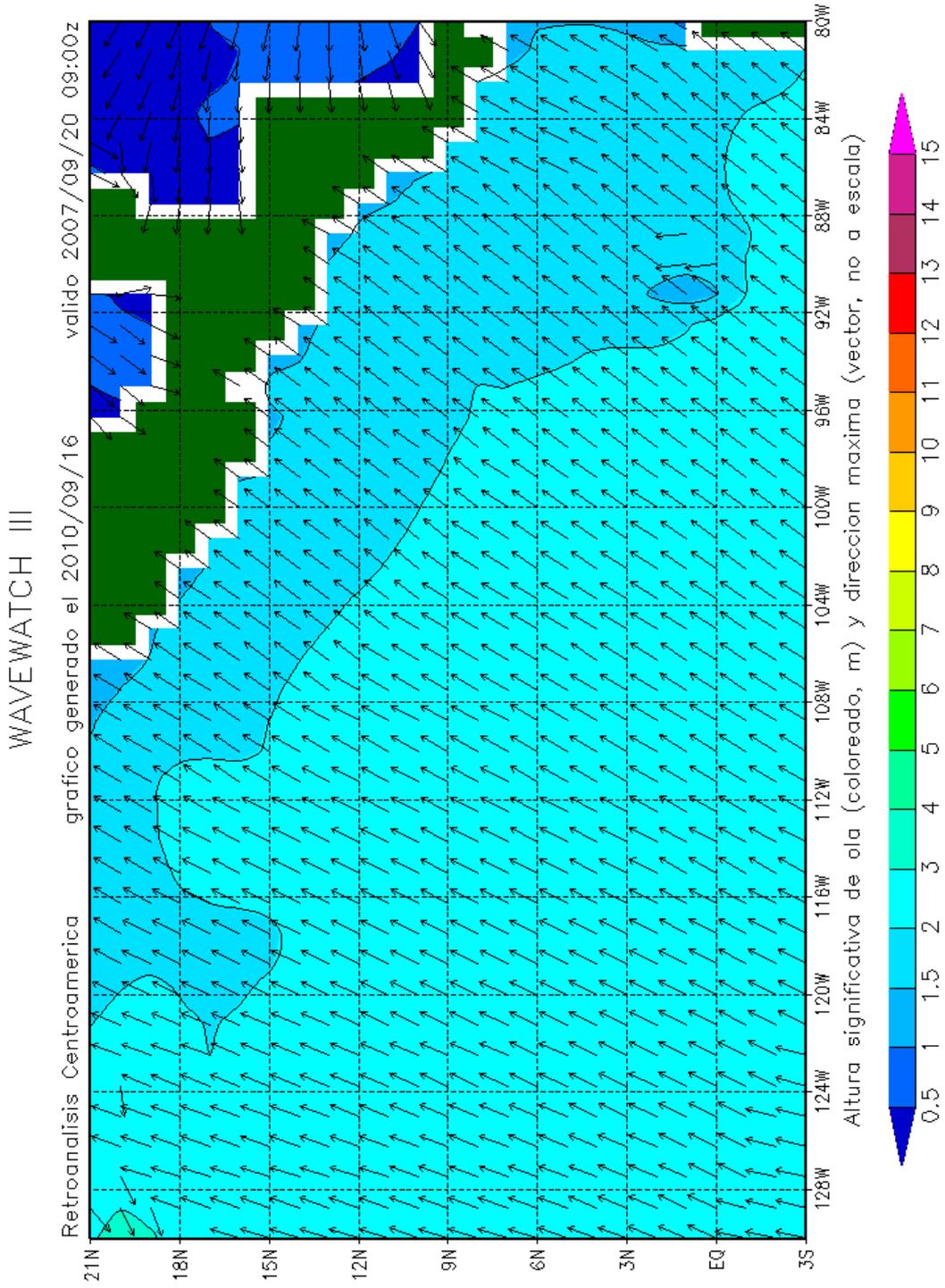


Figura 3.7: Mapa de altura significativa del oleaje y su dirección (vectores). Océano Pacífico centroamericano

WAVEWATCH III

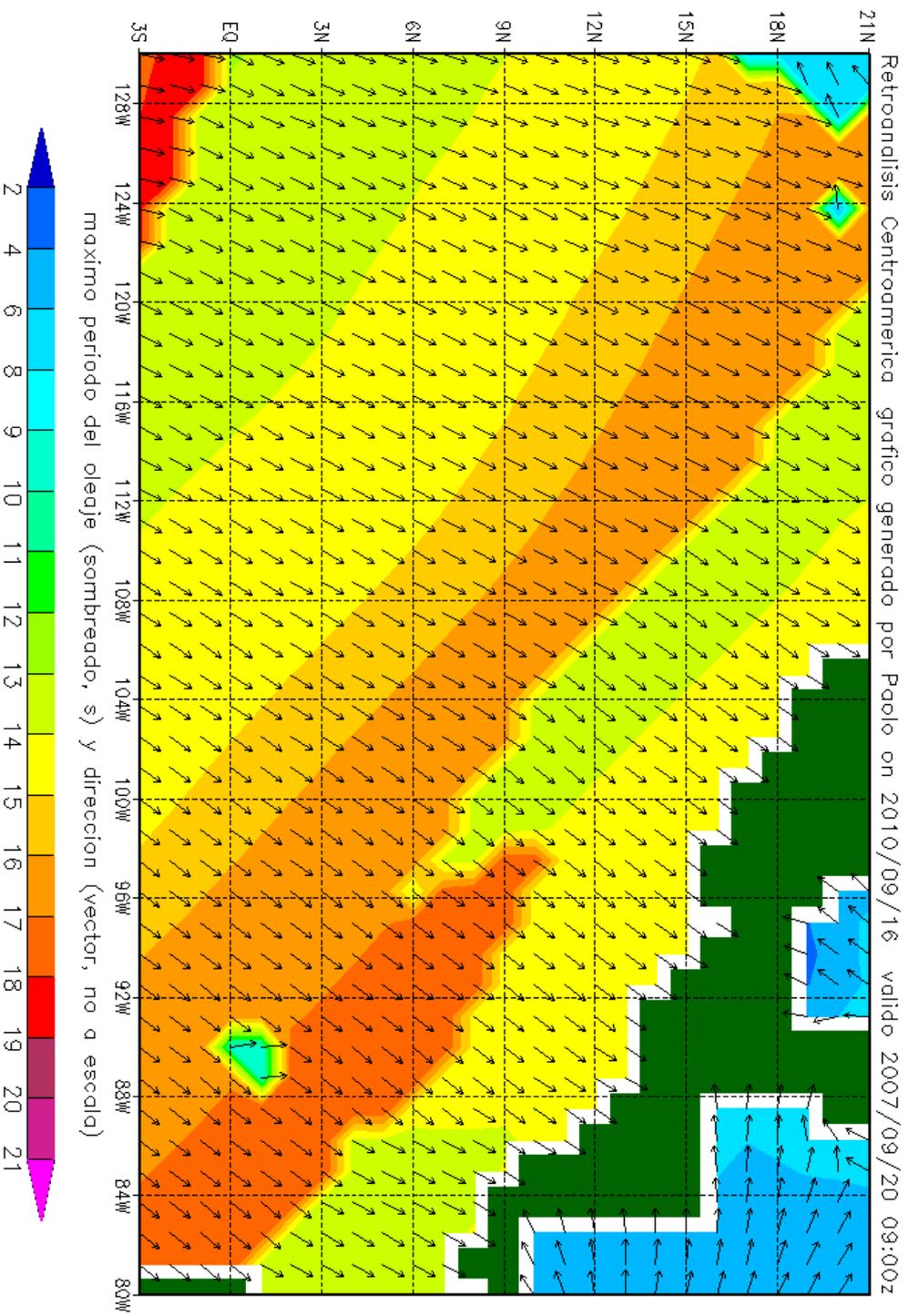


Figura 3.8: Mapa de periodo predominante del oleaje y su dirección (vectores). Océano Pacífico centroamericano

WAVEWATCH III

Retroanálisis global gráfico generado por Paolo on 2010/09/16 valid 2007/12/31 21:00z

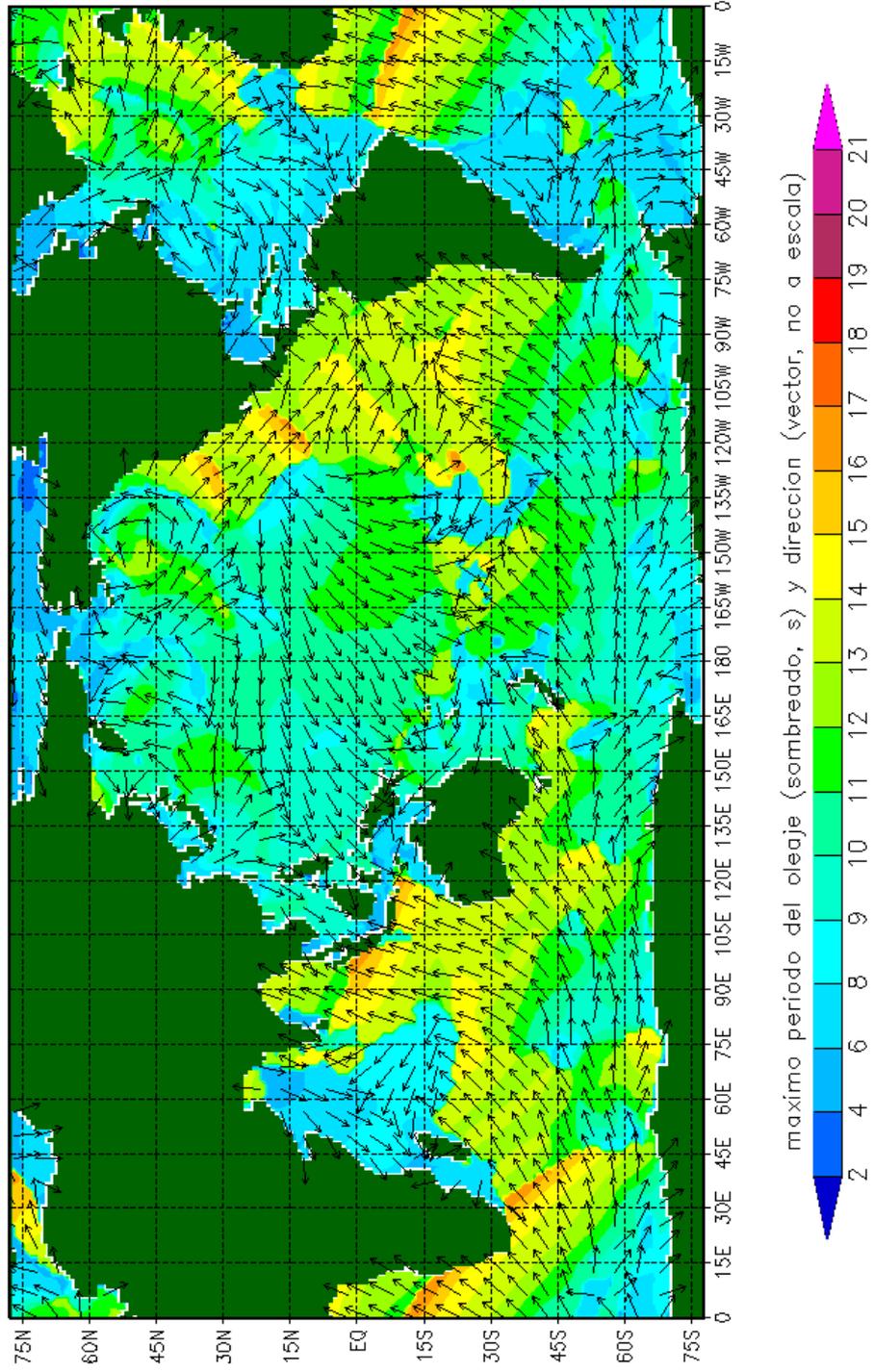


Figura 3.9: Mapa global de período de la componente más energética del oleaje y dirección (vectores)

Capítulo 4

Climatología del oleaje

SE describe la climatología del oleaje, entendida como los valores típicos o más probables de ocurrir tomando como rango temporal de la muestra, el rango de años de los datos utilizados para la modelación, los cuales representan cerca de 14 años de oleaje modelado. Se presenta la climatología como valores estadísticos por año, por estación del año y mes del año.

4.1. Anual

Se obtuvieron los siguientes valores promedios de los principales parámetros de oleaje (altura significativa, dirección, período) así como la magnitud y dirección del viento desde febrero de 1997 a agosto de 2010.

Se muestran tablas con la información referente a los valores de los estadísticos principales de las magnitudes antes mencionada para ambos nodos de la malla computacional cercanos a la costa salvadoreña. Para el Nodo 13N, 90W:

La serie temporal para la altura significativa en el nodo 13N90W para los años desde 1997 a 2010 puede observarse en la figura 4.1.

La serie temporal para el período de la componente más energética en el nodo 13N90W para los años desde 1997 a 2010 puede observarse en la figura 4.2.

La serie temporal para la dirección principal del oleaje en el nodo 13N90W para los años desde 1997 a 2010 puede observarse en la figura 4.3.

De igual manera se presentan tablas para el Nodo 13N, 88.75W.

La serie de tiempo completa de dirección se muestra en la figura 4.6

Cuadro 4.1: Estadísticos anuales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 90W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	2.5	0.2	1.3	1.0	1.3	0.4
1998	2.9	0.6	1.5	1.6	1.5	0.4
1999	3.5	0.6	1.5	1.6	1.5	0.4
2000	2.8	0.6	1.3	1.1	1.3	0.4
2001	2.3	0.6	1.3	1.2	1.3	0.3
2002	2.8	0.6	1.3	1.2	1.3	0.3
2003	2.6	0.6	1.4	1.6	1.4	0.3
2004	2.4	0.6	1.3	1.3	1.3	0.4
2005	2.9	0.5	1.3	1.2	1.3	0.4
2006	2.8	0.6	1.4	1.0	1.3	0.4
2007	2.9	0.6	1.4	1.0	1.3	0.4
2008	2.7	0.6	1.5	1.4	1.5	0.4
2009	2.6	0.6	1.3	1.5	1.3	0.3
2010	3.2	0.8	1.7	1.2	1.6	0.5

Cuadro 4.2: Estadísticos anuales de Periodo máximo (en segundos) para el nodo 13N 90W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	19.7	3.1	13.2	13.4	13.4	2.5
1998	19.7	3.9	13.5	13.4	13.5	2.2
1999	19.8	4.0	13.3	14.7	13.4	2.6
2000	19.5	3.9	13.0	13.3	13.3	2.5
2001	20.0	3.9	13.2	13.4	13.4	2.1
2002	19.9	3.7	12.6	13.4	13.1	2.7
2003	19.7	3.3	13.1	13.4	13.4	2.7
2004	19.9	3.6	13.4	13.5	13.4	2.3
2005	19.8	3.2	13.4	13.3	13.4	1.9
2006	21.2	4.0	13.8	14.8	13.6	1.8
2007	19.9	3.7	13.9	13.4	13.6	1.8
2008	19.8	4.7	14.1	14.6	13.9	1.7
2009	21.6	3.7	14.1	13.4	13.8	1.8
2010	21.7	4.8	14.4	14.7	14.5	1.9

Altura significativa del oleaje
Año 1997 - 2010. Nodo 13N 88.75W
Promedio de la serie: 1.4 m

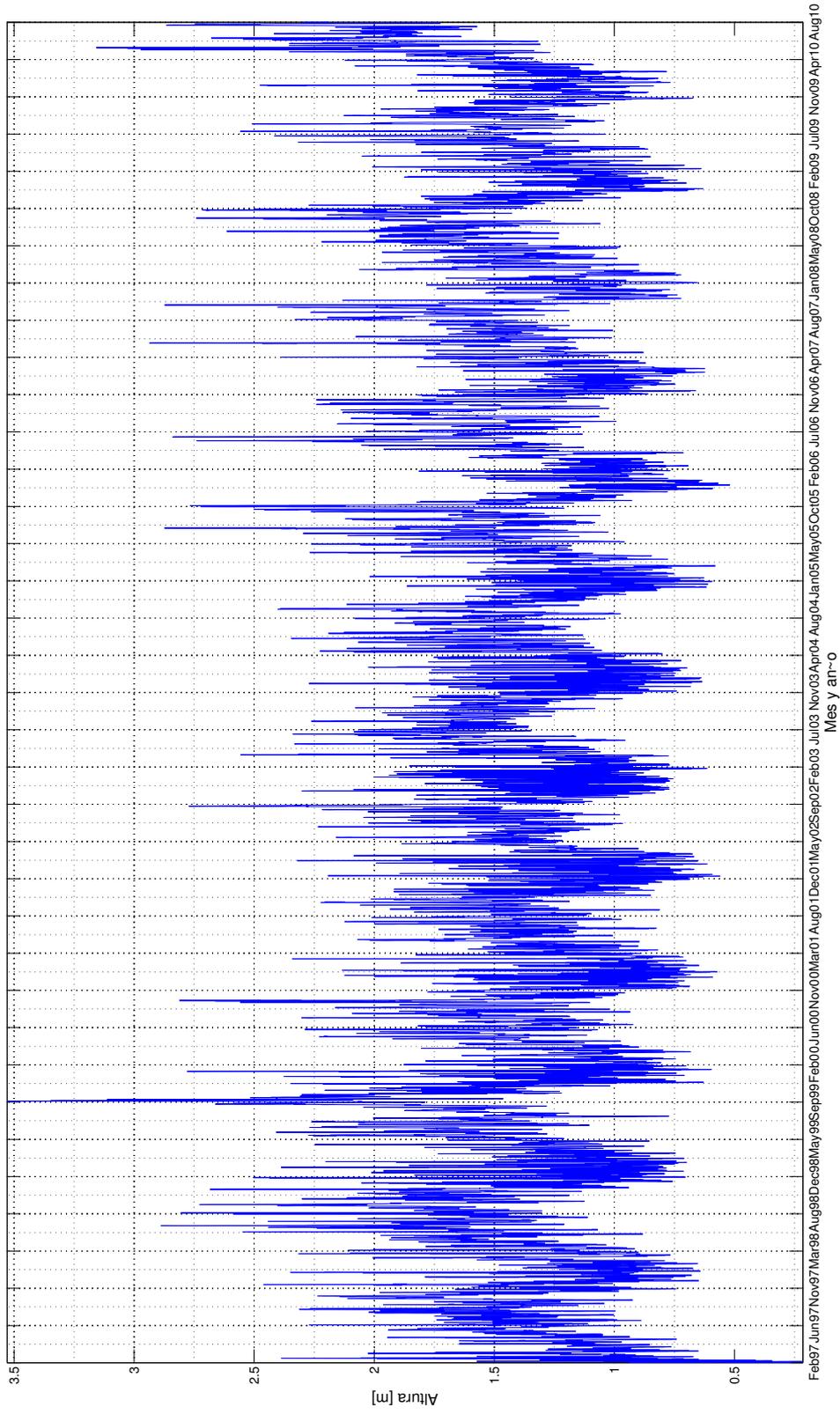


Figura 4.1: Serie temporal de altura significativa. Años 1997-2010

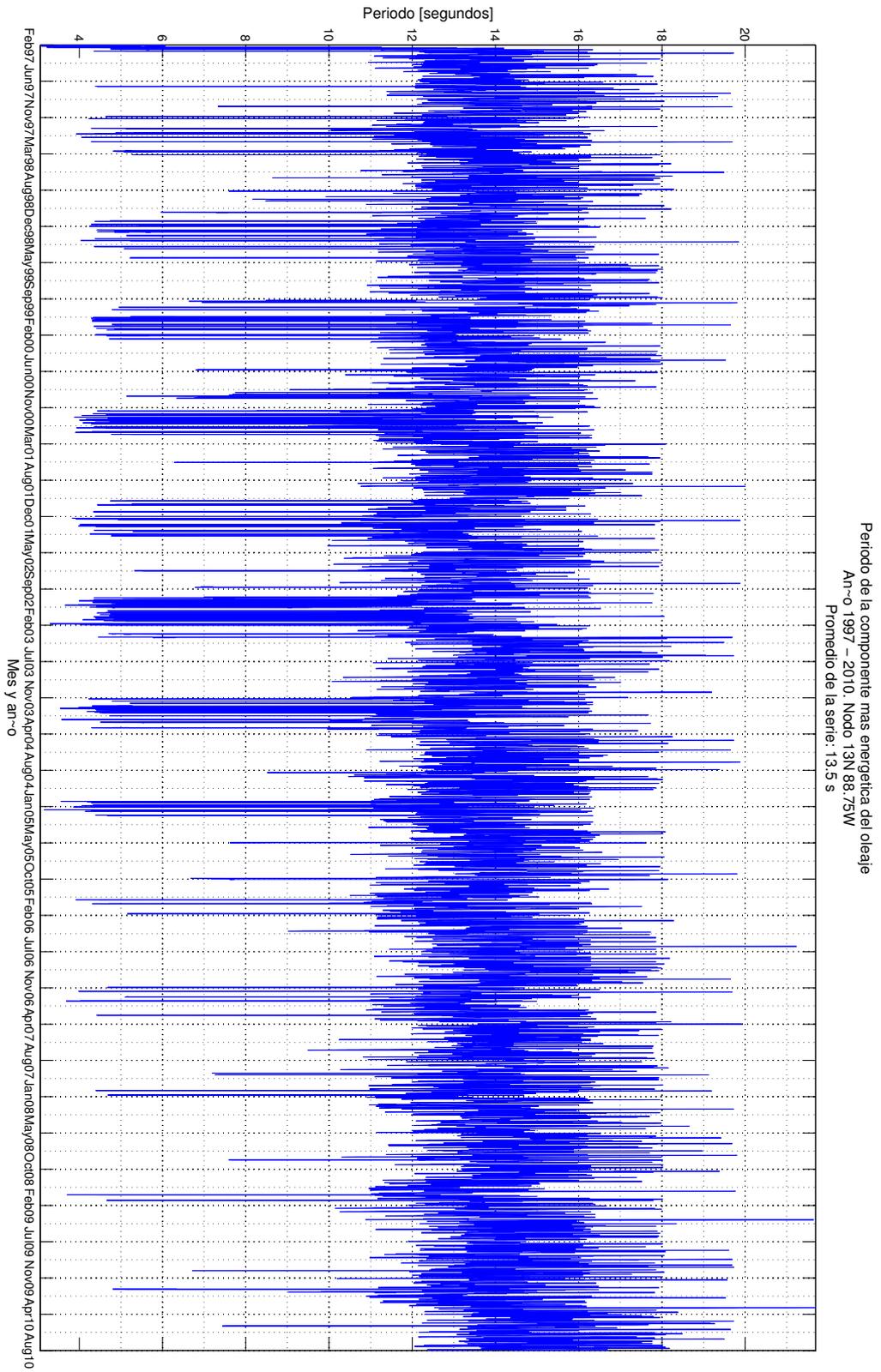


Figura 4.2: Serie temporal de periodo. Años 1997-2010

Cuadro 4.3: Estadísticos anuales de Dirección (en grados sexagesimales) del oleaje para el nodo 13N 90W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	225.6	26.3	202.3	214.2	211.0	32.8
1998	285.4	19.7	205.2	211.8	210.9	33.3
1999	257.3	14.9	199.9	210.9	208.7	40.1
2000	261.5	19.3	198.9	208.6	209.0	41.0
2001	247.2	15.8	200.6	206.5	206.5	31.0
2002	285.7	17.2	197.9	207.2	208.8	43.7
2003	286.1	20.8	197.9	211.0	208.2	42.3
2004	284.3	26.8	202.5	208.3	208.7	31.9
2005	251.0	22.4	206.1	207.4	208.6	22.2
2006	250.6	30.2	206.5	215.2	208.9	19.1
2007	267.0	26.2	207.6	211.9	209.9	16.2
2008	236.0	19.1	207.2	210.5	208.4	10.2
2009	241.8	28.5	207.6	209.2	209.2	13.1
2010	237.5	24.6	205.7	208.4	207.2	18.4

Cuadro 4.4: Estadísticos anuales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	2.0	0.1	1.1	0.9	1.1	0.3
1998	2.5	0.5	1.3	0.8	1.3	0.4
1999	3.1	0.6	1.3	0.7	1.2	0.4
2000	2.6	0.5	1.1	0.9	1.1	0.3
2001	2.0	0.5	1.1	0.9	1.1	0.3
2002	2.4	0.4	1.1	0.8	1.1	0.3
2003	2.1	0.5	1.2	1.3	1.2	0.3
2004	2.1	0.5	1.2	1.2	1.1	0.3
2005	2.5	0.4	1.2	1.1	1.2	0.4
2006	2.5	0.5	1.2	1.5	1.2	0.4
2007	2.5	0.5	1.2	1.3	1.2	0.4
2008	2.3	0.5	1.3	1.1	1.3	0.4
2009	2.3	0.5	1.2	1.3	1.2	0.3
2010	3.1	0.7	1.5	1.6	1.5	0.4

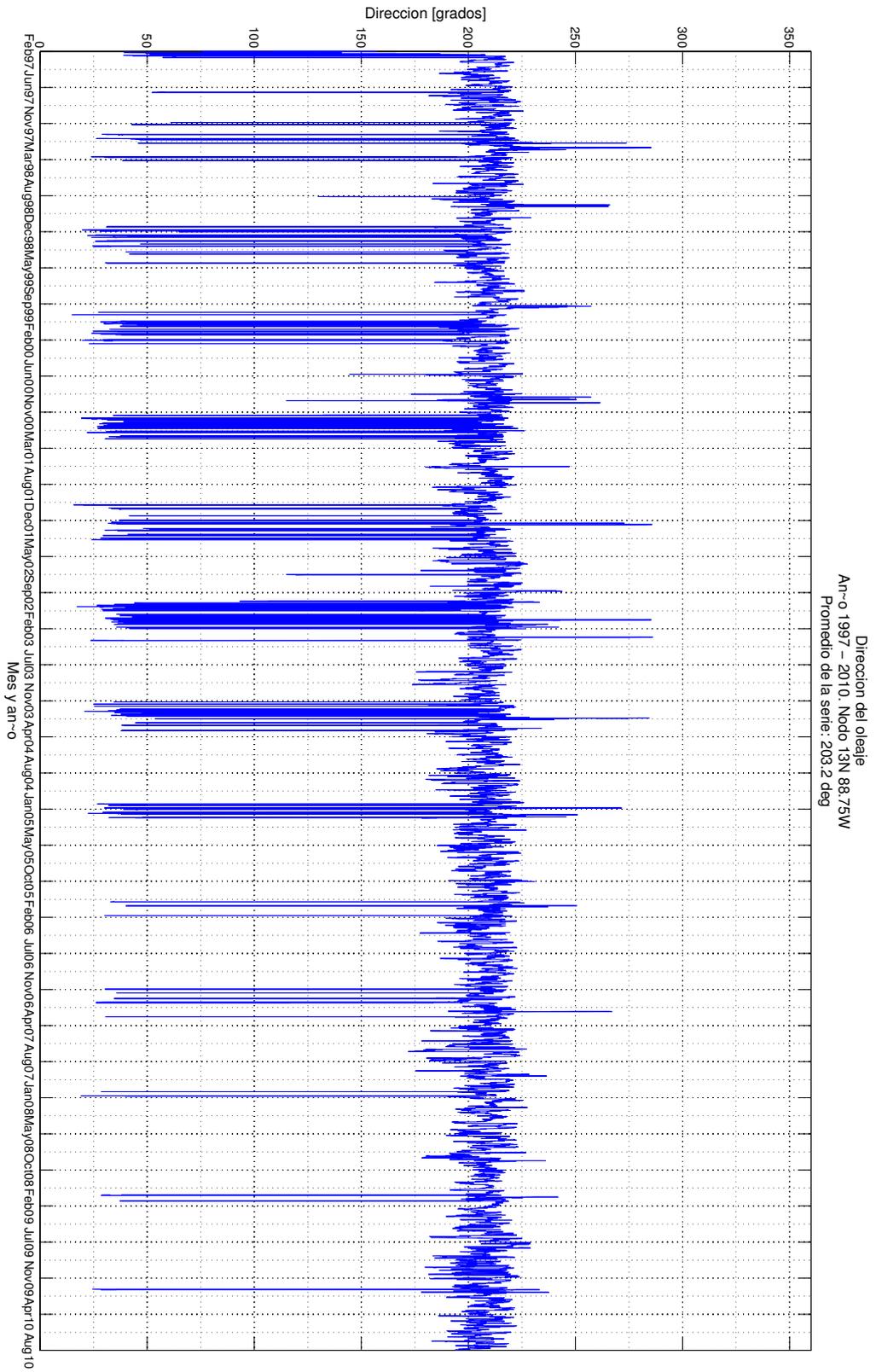


Figura 4.3: Serie temporal de dirección. Años 1997-2010

Altura significativa del oleaje
Año 1997 - 2010. Nodo 13N 88.75W
Promedio de la serie: 1.2 m

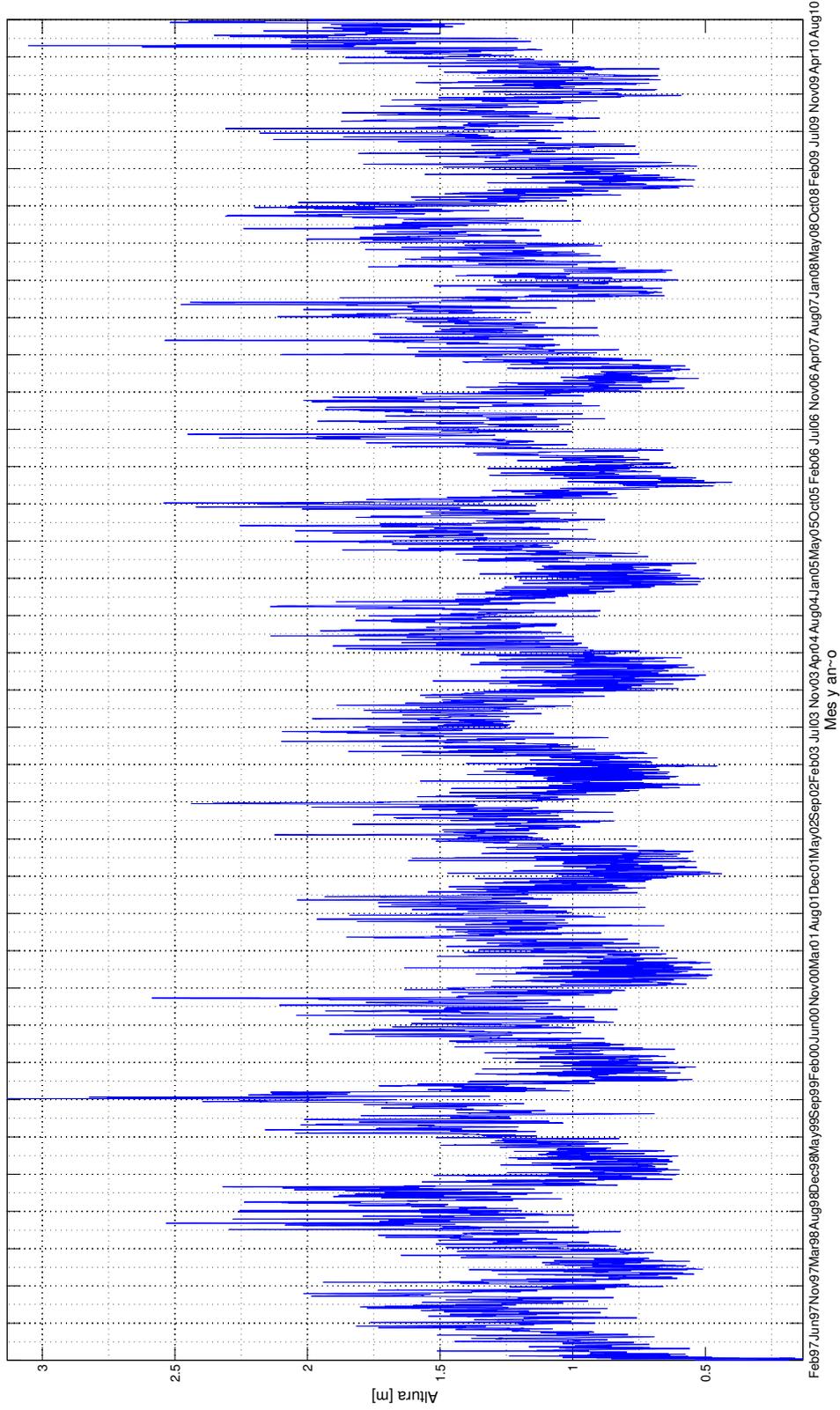


Figura 4.4: Alturas significativas de oleaje modeladas desde 1997 hasta 2010

Cuadro 4.5: Estadísticos anuales de Período (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	19.7	2.3	13.3	13.4	13.4	2.1
1998	18.8	3.6	13.6	13.4	13.4	1.8
1999	19.8	3.9	13.5	13.3	13.4	1.8
2000	19.5	3.3	13.2	13.4	13.3	2.0
2001	19.8	3.3	13.3	13.4	13.3	1.7
2002	20.0	3.1	12.8	13.3	13.0	2.1
2003	20.0	3.6	13.3	13.4	13.4	2.1
2004	19.8	3.5	13.5	13.4	13.4	1.9
2005	19.7	3.0	13.4	13.3	13.4	1.8
2006	19.7	8.7	13.8	13.3	13.5	1.5
2007	19.9	3.1	13.8	13.4	13.6	1.6
2008	19.8	10.6	14.0	14.6	13.8	1.6
2009	20.2	6.7	14.0	13.4	13.7	1.6
2010	21.7	4.8	14.3	14.7	14.4	1.8

Cuadro 4.6: Estadísticos anuales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 88.75W.

Año	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
1997	221.0	4.6	203.9	210.9	208.0	19.9
1998	352.9	0.2	206.8	208.7	207.9	16.5
1999	359.5	2.4	206.0	207.2	206.7	15.8
2000	359.9	0.3	205.2	210.4	206.9	22.3
2001	358.9	0.1	202.7	205.3	205.0	18.7
2002	358.6	0.4	203.1	204.9	206.8	26.9
2003	357.7	1.8	202.7	208.7	206.3	27.2
2004	353.5	2.5	204.2	207.6	206.7	18.4
2005	356.3	2.8	204.9	206.4	206.4	17.0
2006	218.7	177.0	205.9	211.3	206.6	6.3
2007	238.0	25.2	205.7	205.7	207.0	8.9
2008	221.5	181.2	205.3	205.1	206.1	6.4
2009	225.5	182.0	205.6	207.3	206.6	7.3
2010	358.5	11.7	204.7	204.8	205.4	11.8

Período de la componente más energética del oleaje
Año 1997 – 2010. Nodo 13N 88.75W
Promedio de la serie: 13.6 s

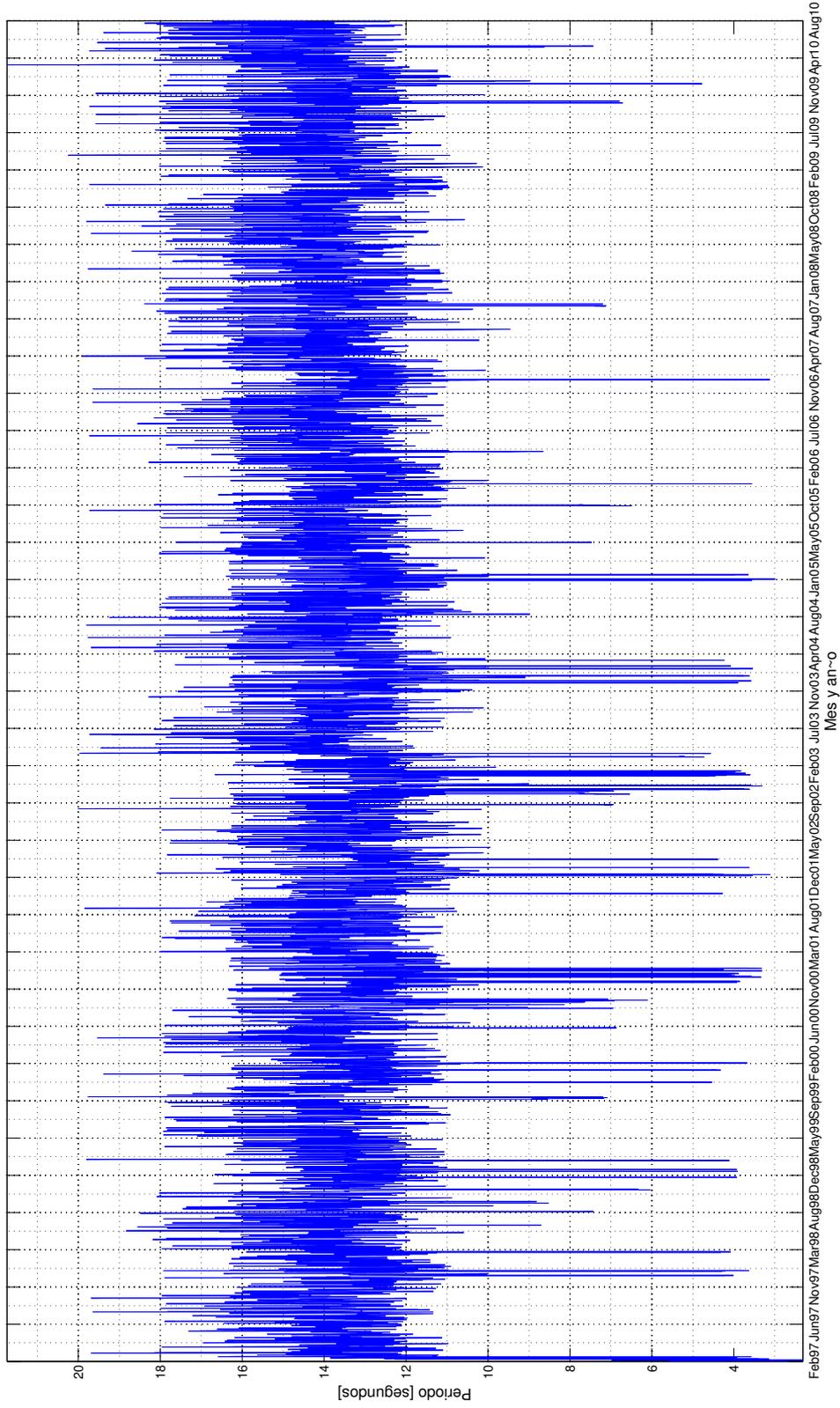


Figura 4.5: Períodos máximos de oleaje modelados desde 1997 hasta 2010

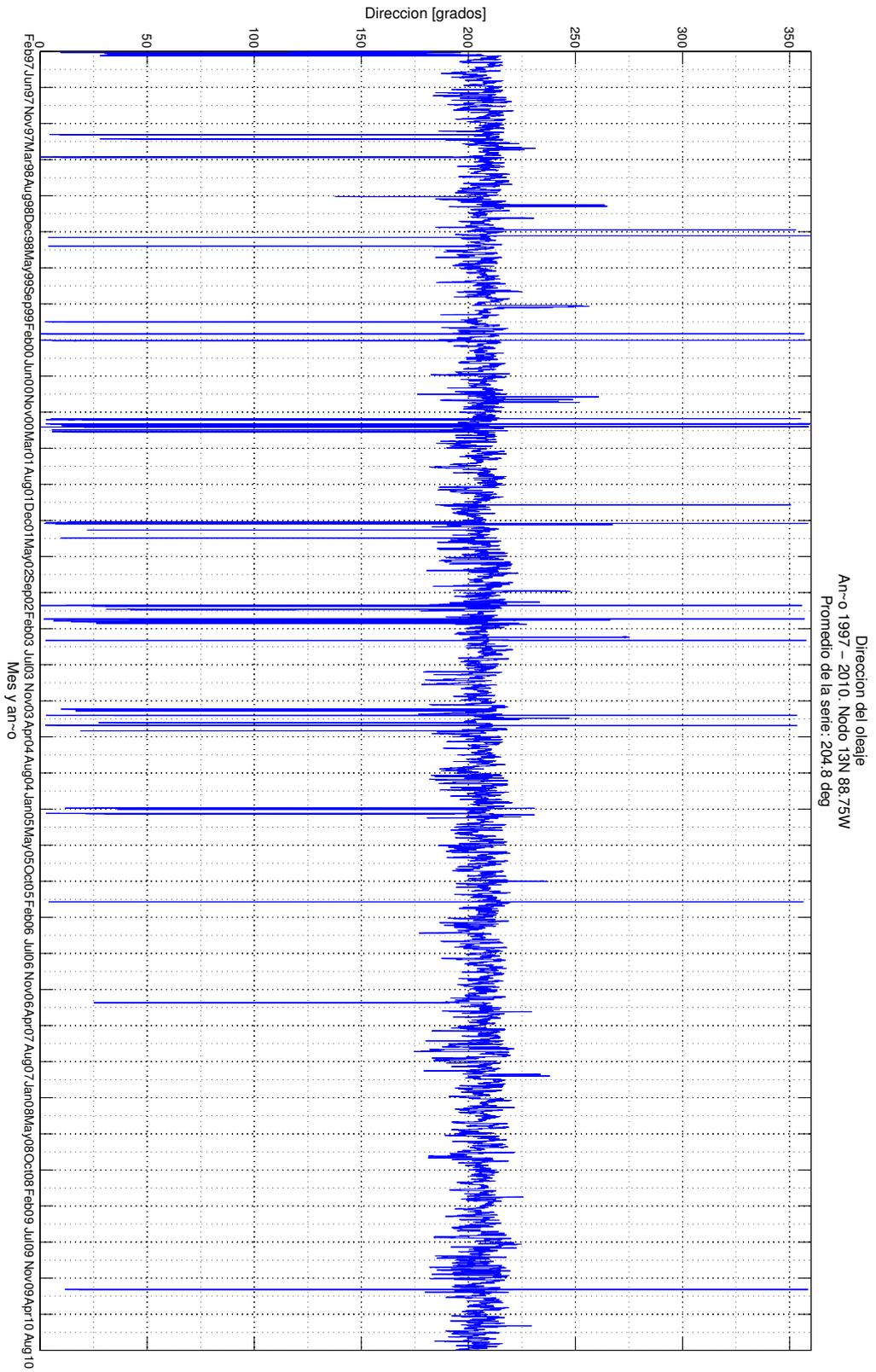


Figura 4.6: Direcciones máximas de oleaje modeladas desde 1997 hasta 2010

4.2. Estacional

Las tablas 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 contienen la información referente a los valores de los estadísticos principales de las magnitudes altura significativa, período y dirección para ambos nodos de la malla computacional cercanos a la costa salvadoreña para las estaciones seca, lluviosa y las transiciones entre ambas estaciones. Para fines prácticos, se consideró la estación lluviosa en el período que va desde la primera semana de junio hasta la última de octubre; la estación seca desde la primer semana de diciembre hasta la última de abril; la transición de estación seca a lluviosa se consideró todo el mes de mayo; y, la transición de lluviosa a seca en el mes de noviembre.

Cuadro 4.7: Estadísticos estacionales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 90W.

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	3.5	0.8	1.6	1.6	1.6	0.3
Lluviosa a seca	2.7	0.7	1.3	1.1	1.2	0.3
Seca	2.8	0.2	1.1	1.0	1.1	0.3
Seca a Lluviosa	3.2	0.9	1.5	1.3	1.4	0.3

De acuerdo a la tabla 4.7, se observa que en la estación lluviosa, la altura significativa del oleaje es mayor que en el resto de las estaciones, con un promedio de 1.6 metros. En la estación seca la altura significativa del oleaje es menor en comparación al resto de las estaciones, con un promedio de 1.1 metros. En la transición de estación seca a estación lluviosa, la altura es mayor que en estación seca, pero menor que en estación lluviosa, con un promedio de 1.5 metros.

Cuadro 4.8: Estadísticos estacionales de Período mas energético (en segundos) para el nodo 13N 90W.

Estación	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	21.2	4.4	14.0	13.4	13.8	1.8
Lluviosa a seca	18.1	3.7	13.2	13.4	13.4	2.3
Seca	21.7	3.1	12.9	13.4	13.2	2.6
Seca a Lluviosa	19.7	7.4	14.2	14.6	14.2	1.6

La tabla 4.8 sugiere que, se observa que en la transición de estación seca a estación lluviosa, el período predominante del oleaje es mayor que en el resto de las estaciones, con un promedio de 14.2 segundos. En la estación seca el período del oleaje es menor en comparación al resto de las estaciones, con un promedio de 12.9 segundos. En la transición de estación lluviosa a estación seca,

el período es mayor que en estación seca, pero menor que en estación lluviosa, con un promedio de 13.2 segundos. Los máximos generalmente ocurren durante las estaciones seca y lluviosa.

Cuadro 4.9: Estadísticos estacionales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 90W.

Estación	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	266.1	15.8	208.4	211.1	209.4	11.1
Lluviosa a seca	233.2	14.9	202.4	210.9	210.0	33.7
Seca	286.1	19.1	197.1	210.3	208.1	43.1
Seca a Lluviosa	224.6	183.4	208.0	207.1	208.3	7.8

Según la tabla 4.9 la dirección del oleaje no tiende a cambiar en mayor grado durante las distintas estaciones, manteniéndose alrededor de los 210 grados, pero que existen oleajes locales, es decir, generados por sistemas atmosféricos locales.

Para el nodo 13N, 88.75W, el cuadro 4.10 muestra los valores de los estadísticos máximo, mínimo, promedio, moda, mediana y desviación estándar de la altura significativa, para las estaciones y transición entre estaciones del año.

Cuadro 4.10: Estadísticos estacionales de Altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.

Estación	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	3.1	0.7	1.4	1.4	1.4	0.3
Lluviosa a seca	2.3	0.6	1.1	0.8	1.1	0.3
Seca	2.1	0.1	0.9	0.9	0.9	0.3
Seca a lluviosa	3.1	0.8	1.3	1.2	1.3	0.3

Para el nodo 13N, 88.75W, el cuadro 4.11 muestra los valores de los estadísticos máximo, mínimo, promedio, moda, mediana y desviación estándar de período de la componente más energética para las estaciones y transición entre estaciones del año.

Para el nodo 13N, 88.75W, el cuadro 4.12 muestra los valores de los estadísticos máximo, mínimo, promedio, moda, mediana y desviación estándar de la dirección principal del oleaje para las estaciones y transición entre estaciones del año. Las direcciones, que sugieren desde dónde viene el oleaje, tienden a ser más dispersas (analizando las desviaciones estándar) durante la estación seca que durante la estación lluviosa.

Cuadro 4.11: Estadísticos estacionales de Período mas energético (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.

Estación	Maximo	Minimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	20.0	4.3	13.9	13.4	13.6	1.7
Lluviosa a seca	18.0	3.6	13.3	13.4	13.3	1.7
Seca	21.7	2.3	13.1	13.4	13.2	2.0
Seca a lluviosa	19.7	7.4	14.1	13.4	13.9	1.5

Cuadro 4.12: Estadísticos estacionales de Dirección (en grados sexagesimales) para el nodo 13N 88.75W.

Estación	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
Lluviosa	350.5	137.8	206.2	206.4	207	8.3
Lluviosa a seca	355.7	0.4	205.6	209.4	207.5	14.8
Seca	359.9	0.1	202.9	206.8	206.3	24.7
Seca a lluviosa	229.5	186.0	205.7	205.2	206.0	6.4

4.3. Mensual

El cuadro 4.13 contiene los valores estadísticos referentes a la altura significativa en los meses del año para el nodo 13N 90W. Se observa que la altura significativa de las olas, en promedio, es mayor en el mes de septiembre y menor en el mes de febrero.

Cuadro 4.13: Estadísticos mensuales de altura significativa (en metros) nodo 13N 90W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	2.8	0.6	1.1	0.9	1.0	0.3
febrero	2.4	0.2	1.0	0.9	1.0	0.3
marzo	2.6	0.6	1.1	1.0	1.1	0.3
abril	2.4	0.7	1.3	1.1	1.3	0.3
mayo	3.2	0.9	1.5	1.3	1.4	0.3
junio	2.9	0.8	1.6	1.4	1.6	0.3
julio	2.9	0.9	1.6	1.6	1.5	0.3
agosto	2.9	0.8	1.6	1.5	1.6	0.3
septiembre	3.5	0.8	1.7	1.5	1.6	0.4
octubre	3.1	0.8	1.6	1.3	1.5	0.4
noviembre	2.7	0.7	1.3	1.1	1.2	0.3
diciembre	2.5	0.5	1.1	0.9	1.0	0.3

El cuadro 4.14 contiene los valores estadísticos del período referentes a los meses del año para el nodo 13N 90W. Se observa que el período de las olas, en promedio, es mayor durante los meses de mayo y junio y menor en los meses de diciembre y enero.

Cuadro 4.14: Estadísticos mensuales de período (en segundos) nodo 13N 90W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	19.9	3.2	12.0	13.3	12.5	3.2
febrero	19.8	3.1	12.6	12.2	13.0	2.7
marzo	21.7	4.3	13.3	13.4	13.3	2.0
abril	21.6	5.2	14.1	14.6	13.9	1.6
mayo	19.7	7.4	14.2	14.6	14.2	1.6
junio	21.2	6.3	14.2	13.4	14.0	1.6
julio	19.9	4.4	13.9	13.4	13.6	1.6
agosto	19.8	7.6	13.9	13.3	13.6	1.6
septiembre	20.0	5.1	14.0	14.8	14.1	1.9
octubre	19.8	4.6	13.8	13.4	13.6	2.0
noviembre	18.1	3.7	13.2	13.4	13.4	2.3
diciembre	19.7	3.5	12.3	13.4	12.7	2.9

El cuadro 4.15 contiene los valores estadísticos de la dirección referentes a los meses del año para el nodo 13N 90W. Se observa que la dirección se mantiene prácticamente invariable durante los meses del año, pero principalmente durante el mes de mayo. Las direcciones son mas dispersas durante el mes de enero, considerando como parámetro de dispersión la desviación estándar.

El cuadro 4.16 contiene los valores estadísticos referentes a la altura significativa en los meses del año para el nodo 13N 88.75W. Se observa que la altura significativa de las olas, en promedio, es mayor durante los meses de junio y septiembre y menores durante los meses de enero y febrero. Con máximos en los meses de mayo y septiembre; los mínimos ocurren durante los meses de diciembre y enero.

El cuadro 4.17 contiene los valores estadísticos del período referentes a los meses del año para el nodo 13N 88.75W. Se observa que el período de las olas, en promedio, es mayor durante los meses de abril, mayo y junio; pero menor durante los meses de diciembre, enero y febrero. Los máximos y mínimos se mantienen dentro de los mismos rangos durante todo el año.

El cuadro 4.18 contiene los valores estadísticos de la dirección referentes a los meses del año para el nodo 13N 88.75W. Se observa que la dirección se mantiene prácticamente invariable durante los meses del año, pero principalmente durante los meses de mayo y octubre. Las direcciones son mas dispersas durante el mes de enero, considerando como parámetro de dispersión la desviación

Cuadro 4.15: Estadísticos mensuales de dirección (en grados) nodo 13N 90W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	285.7	19.1	184.8	209.9	206.5	60.6
febrero	285.4	19.7	198.0	210.2	209.5	42.7
marzo	286.1	23.6	204.2	210.3	208.1	25.4
abril	222.9	30.4	207.0	207.4	208.4	12.1
mayo	224.6	183.4	208.0	207.1	208.3	7.8
junio	247.2	144.5	208.3	211.0	209.3	9.7
julio	228.9	52.3	209.1	211.0	210.7	11.3
agosto	229.0	129.8	206.6	212.4	207.1	9.9
septiembre	266.1	115.2	209.0	209.2	209.7	11.1
octubre	261.5	15.8	209.1	211.1	209.4	13.3
noviembre	233.2	14.9	202.4	210.9	210.0	33.7
diciembre	271.5	19.3	190.7	204.8	207.2	53.2

Cuadro 4.16: Estadísticos mensuales de altura significativa (en metros) para el nodo 13N 88.75W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	1.6	0.4	0.8	0.7	0.8	0.2
febrero	1.8	0.1	0.8	0.7	0.8	0.2
marzo	1.9	0.5	1.0	0.9	1.0	0.2
abril	2.1	0.7	1.2	1.1	1.2	0.2
mayo	3.1	0.8	1.3	1.2	1.3	0.3
junio	2.5	0.7	1.5	1.2	1.4	0.3
julio	2.4	0.8	1.4	1.4	1.4	0.3
agosto	2.5	0.7	1.4	1.3	1.4	0.3
septiembre	3.1	0.7	1.5	1.3	1.5	0.3
octubre	2.8	0.7	1.4	1.2	1.4	0.3
noviembre	2.3	0.6	1.1	0.8	1.1	0.3
diciembre	1.6	0.4	0.9	0.7	0.9	0.2

Cuadro 4.17: Estadísticos mensuales de período (en segundos) para el nodo 13N 88.75W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	19.7	3.0	12.6	12.1	12.8	2.3
febrero	19.8	2.3	12.9	13.4	13.0	2.1
marzo	21.7	4.1	13.3	13.3	13.3	1.7
abril	20.2	4.6	14.1	13.4	13.8	1.6
mayo	19.7	7.4	14.1	14.6	14.0	1.5
junio	19.8	6.9	14.1	14.7	13.9	1.6
julio	19.8	9.5	13.9	13.4	13.6	1.5
agosto	19.8	6.9	13.9	14.6	13.6	1.6
septiembre	20.0	6.1	14.0	13.4	13.9	1.9
octubre	19.8	4.3	13.7	13.2	13.5	2.0
noviembre	18.0	3.6	13.3	13.4	13.3	1.7
diciembre	19.6	3.3	12.8	12.2	12.8	2.0

estándar.

Cuadro 4.18: Estadísticos mensuales de dirección (en grados) para el nodo 13N 88.75W.

Meses	Máximo	Mínimo	Promedio	Moda	Mediana	Desviación Estándar
enero	359.5	0.1	199.1	206.8	206.0	38.0
febrero	357.8	1.1	203.0	208.3	207.1	23.1
marzo	357.7	0.2	204.1	207.8	206.0	17.3
abril	218.3	22.9	205.1	206.7	206.0	7.7
mayo	229.5	186.0	205.7	205.2	206.0	6.4
junio	220.4	180.1	205.7	207.4	206.7	7.7
julio	224.7	174.6	206.8	207.5	207.8	7.4
agosto	225.1	137.8	204.5	209.9	205.2	8.0
septiembre	264.8	176.2	206.8	206.4	207.1	10.0
octubre	350.5	182.0	207.4	207.3	206.8	8.3
noviembre	355.7	0.4	205.6	209.4	207.5	14.8
diciembre	359.9	2.7	203.2	205.0	206.4	27.3

Capítulo 5

Validación de resultados

PARA comprobar los resultados obtenidos, se realizaron comparaciones estadísticas de las salidas de esta investigación con salidas obtenidas por la NOAA (de manera operativa) mediante histogramas y correlaciones de las magnitudes del oleaje, puesto no se tienen mediciones de oleaje cercanos a los nodos analizados, sin embargo al comparar con los datos provistos por la NOAA los cuales sí se encuentran validados contra mediciones y datos de asimilación (barcos, boyas, modelos numérico, entre otros), representa una medida fiable para establecer una comparación.

5.1. Histogramas

Se compararon las alturas significativas, períodos y direcciones modeladas con las del modelo operacional mediante la elaboración de histogramas para el nodo 13N 90W como puede observarse en la figura 5.1 y para el nodo 13N 88.75W en la figura 5.2. Se observan tendencias muy similares en cuanto a la frecuencia de ocurrencia de las magnitudes presentadas.

5.2. Correlaciones

SE correlacionaron alturas significativas, período y dirección modeladas con Wavewatch-III en sus versiones 2.22 y 3.14, con las proporcionadas por el Servicio Oceanográfico Nacional (SON). En cada figura se muestran las curvas que mejor se ajustan, con sus respectivos valores.

La correlación de alturas significativas para el año 1997 usando Wavewatch-III 2.22 y datos de viento de la base de datos de reanálisis se muestra en la figura 5.3, la cual es indicativa que al

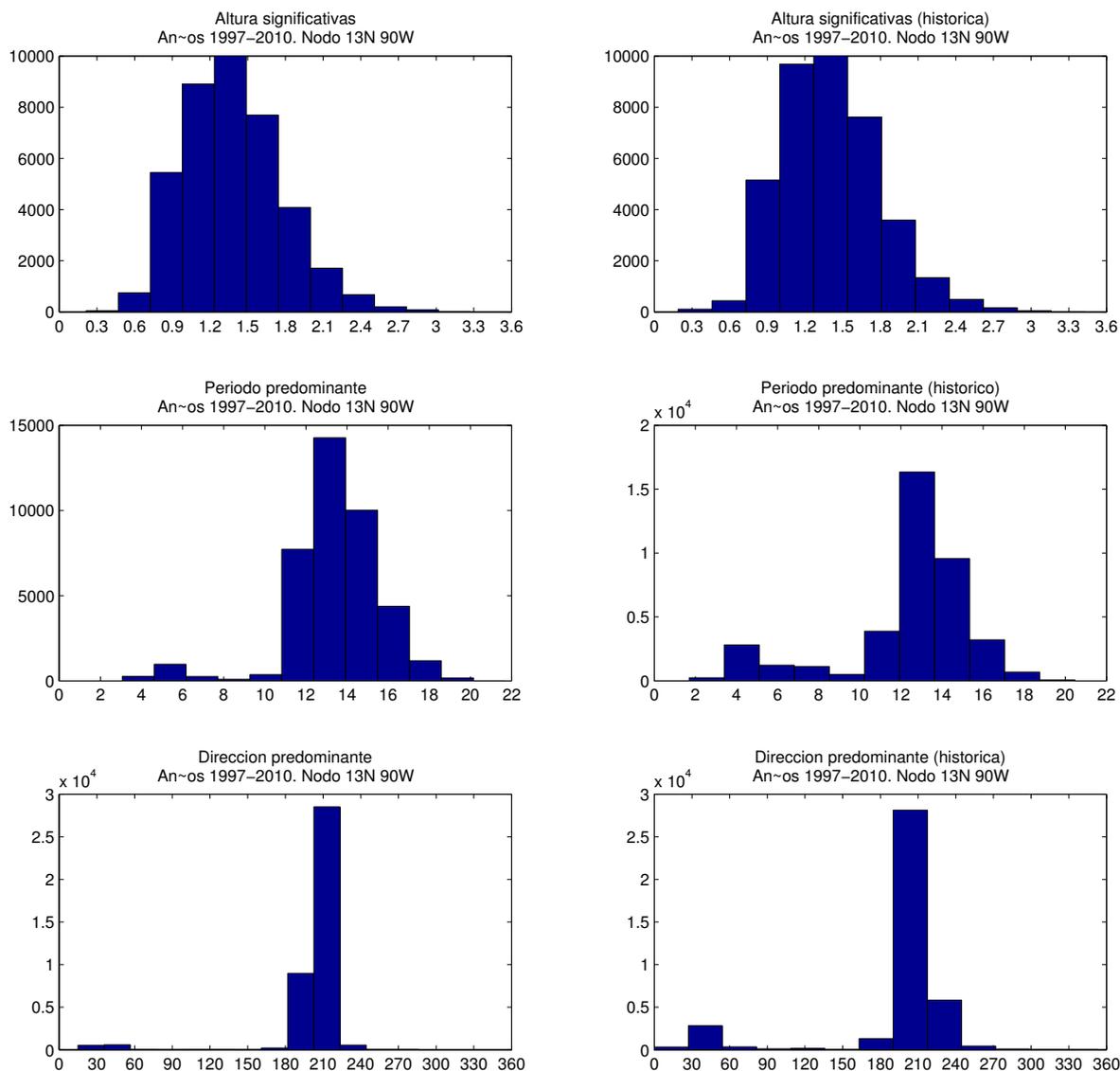


Figura 5.1: Columna izquierda: Histogramas de altura significativa, período y dirección del oleaje modelados en el nodo 13N 90W. Columna derecha: Histogramas con las salidas almacenadas (históricas) para el mismo nodo.

usar los datos de viento de reanálisis, se obtienen resultados mas dispersos comparados con los del SON.

Observando la correlación de alturas significativas para los años desde 1997 a 2010 usando Wavewatch-III 3.14 y datos de viento del modelo GFS, para el nodo 13N 90W que se muestra en la figura 5.4 es indicativo que existe muy buena correspondencia entre las salidas obtenidas respecto a las históricas, sin embargo existen diferencias.

El gráfico de correlación de período de la figura 5.5 muestra que los datos modelados con el

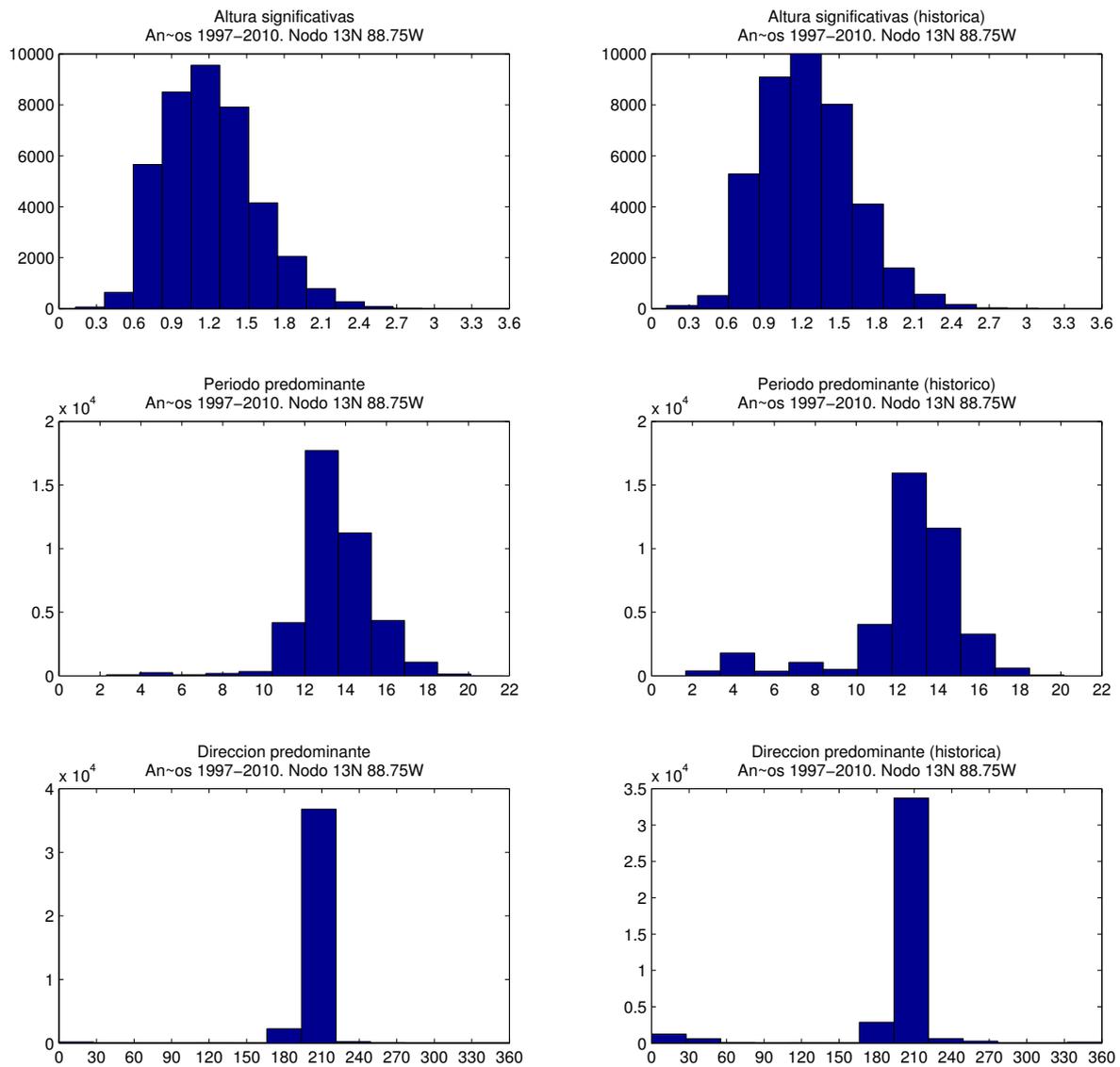


Figura 5.2: Columna izquierda: Histogramas de altura significativa, período y dirección del oleaje modelados en el nodo 13N 88.75W. Columna derecha: Histogramas con las salidas almacenadas (históricas) para el mismo nodo.

viento GFS utilizado tienden a representar mejor los oleajes distantes (período largos, de más de 10 segundos), tiende a “confundir” el oleaje local (períodos menores a 10 segundos) y lo representa como oleaje distante.

Situación similar al período ocurre con la representación de la dirección, cuando el oleaje es local, esto es direcciones entre 0 a 90 grados y entre 270 a 360 grados, como puede observarse en la figura 5.6.

La correlación de alturas significativas para los años desde 1997 a 2010 usando Wavewatch-III

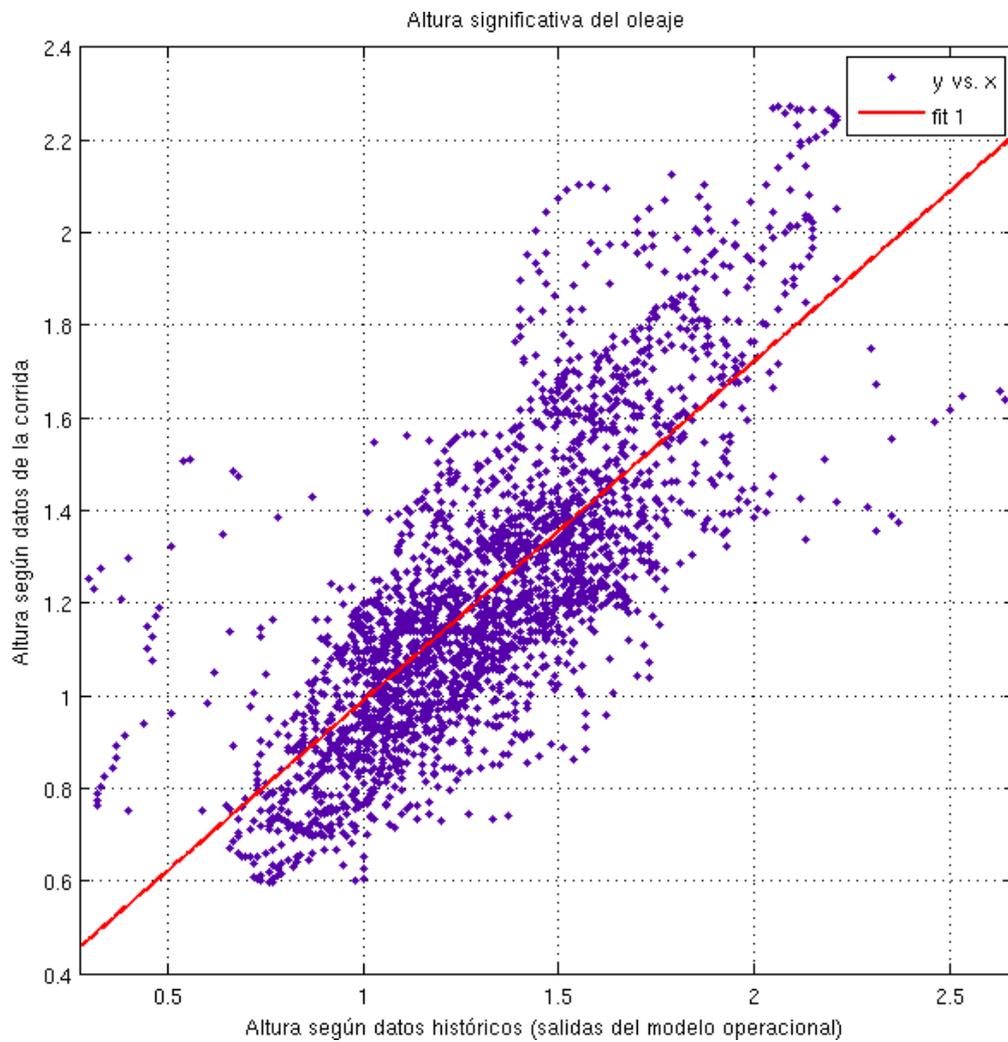


Figura 5.3: Validación de Hs con WW3 v2.22 vs operacional usando vientos de Reanálisis (NCEP). Año 1997

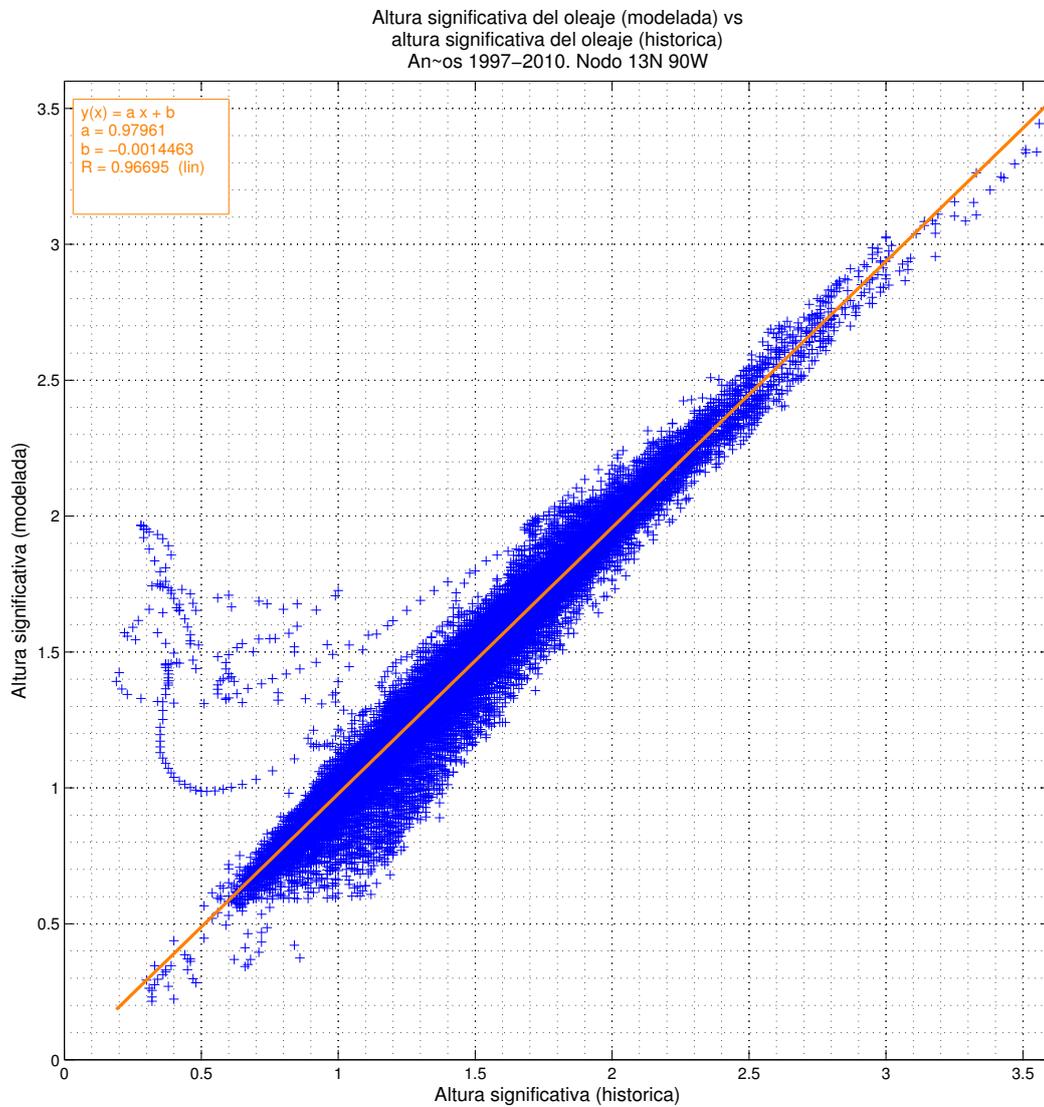


Figura 5.4: Validación de Hs empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

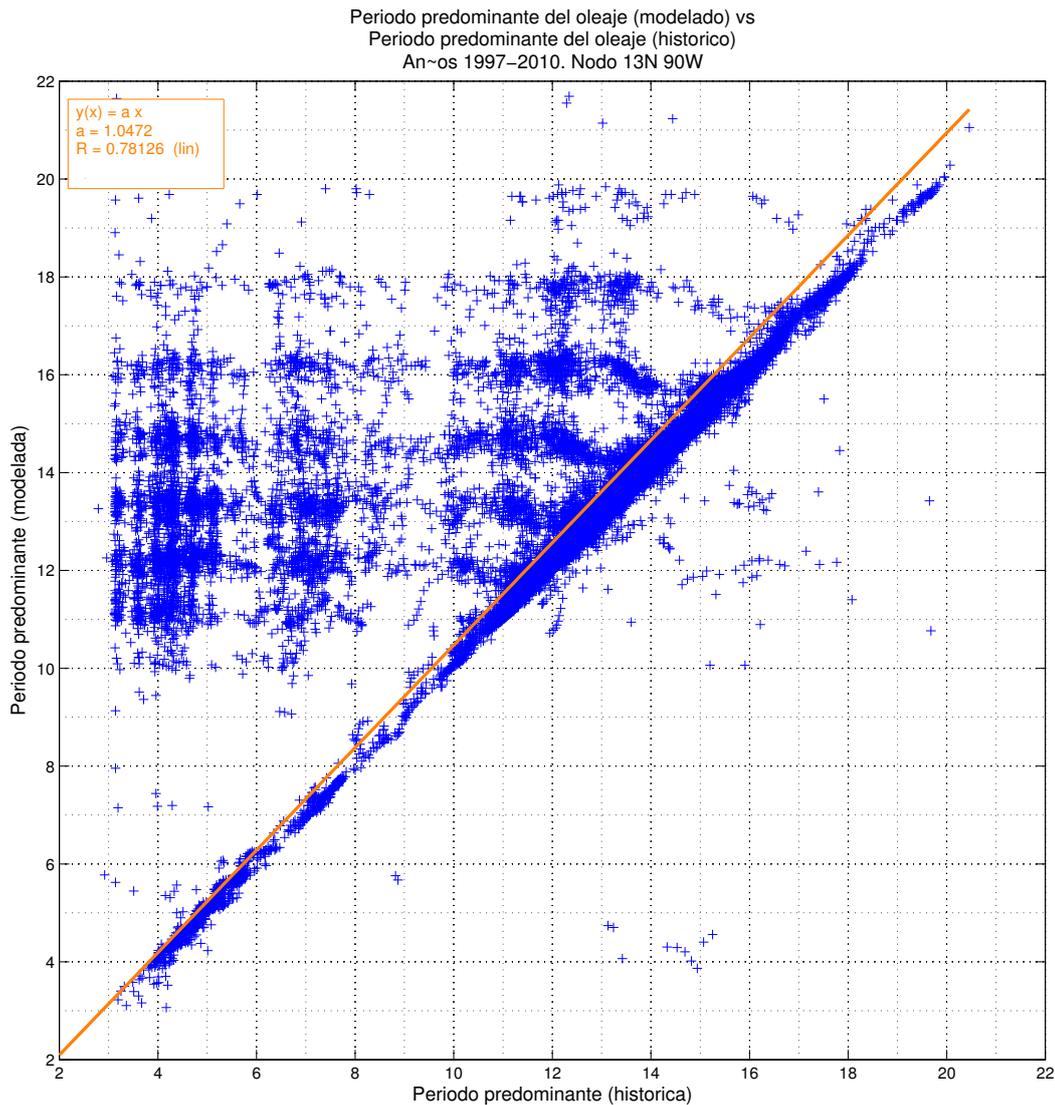


Figura 5.5: Validación de periodo empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

3.14 y datos de viento del modelo GFS, para el nodo localizado en 13N 88.75W se muestra en la figura 5.7, la de período en la figura 5.8 y la de dirección en la figura 5.9.

La interpretación de este nodo es similar a la del nodo localizado en 13N 90W.

Se observa una mejor correlación de los datos de altura significativa usando la versión 3.14 de Wavewatch-III forzado con vientos provenientes del modelo GFS, razón por la cual se decidió utilizar estos últimos en la investigación.

Las diferencias pueden deberse a varios factores, uno de ellos es el esquema de propagación utilizado, el cual fue Ultimate Quickest (PR3 en los interruptores del modelo), pero principalmente

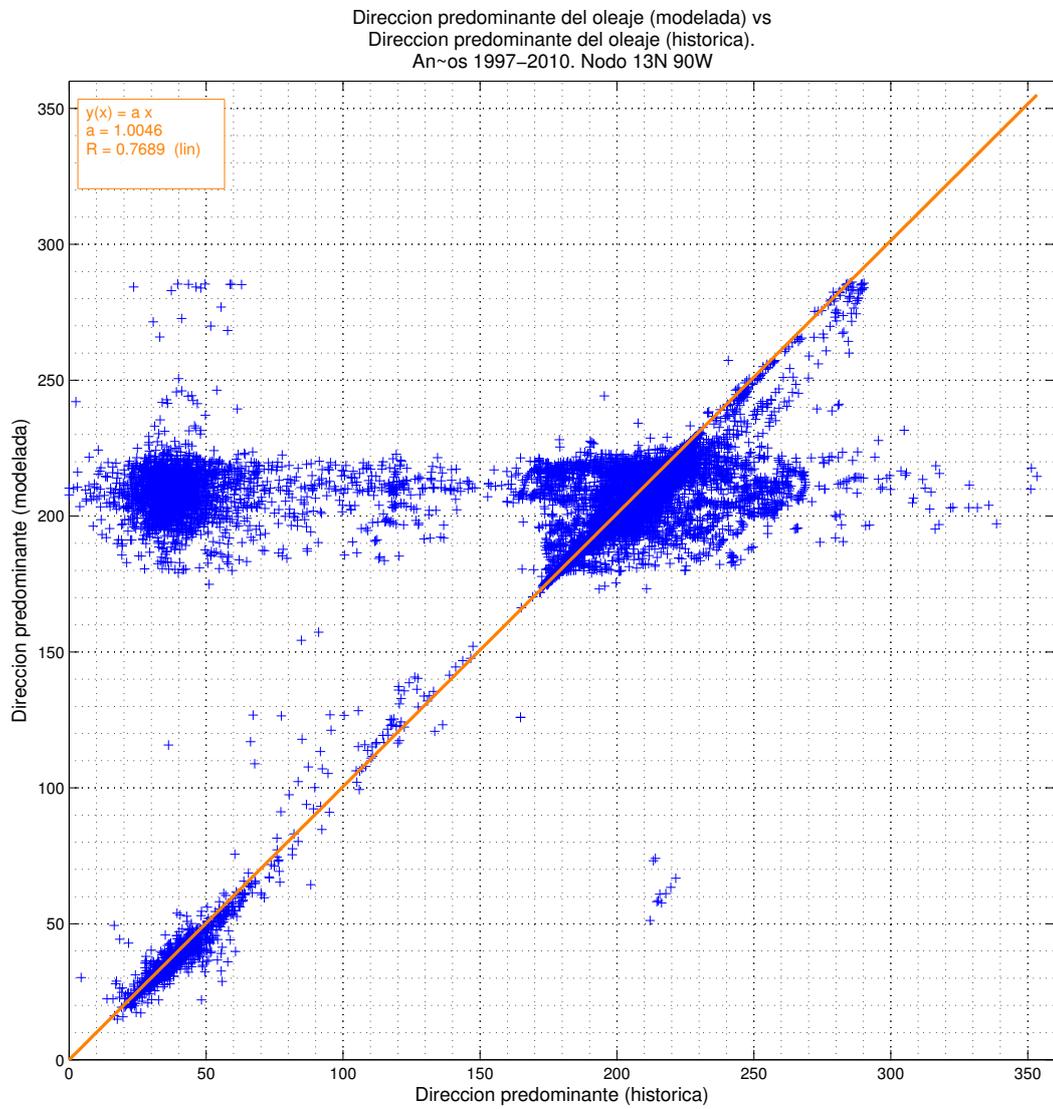


Figura 5.6: Validación dirección empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

Altura significativa del oleaje (modelada) vs
altura significativa del oleaje (historica)
Años 1997-2010. Nodo 13N 88.75W

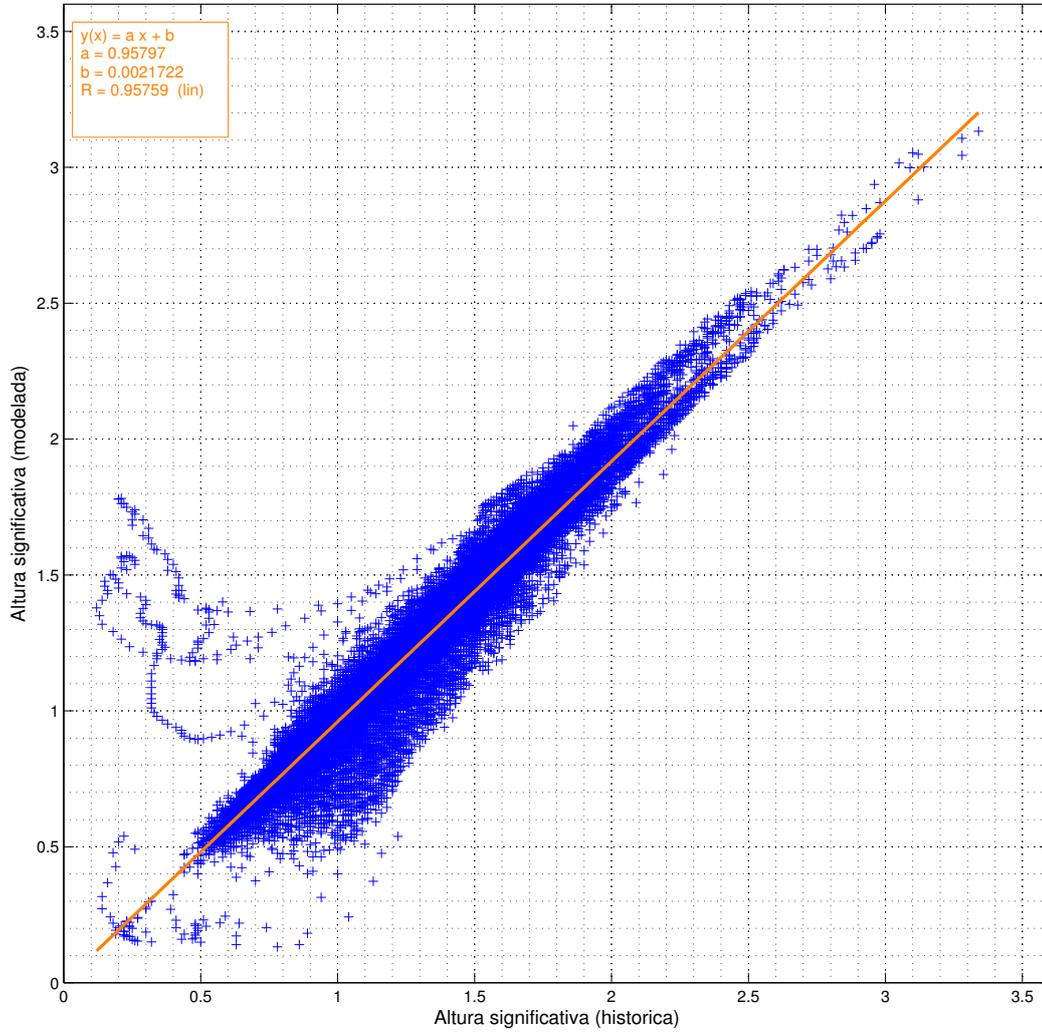


Figura 5.7: Validación de Hs empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

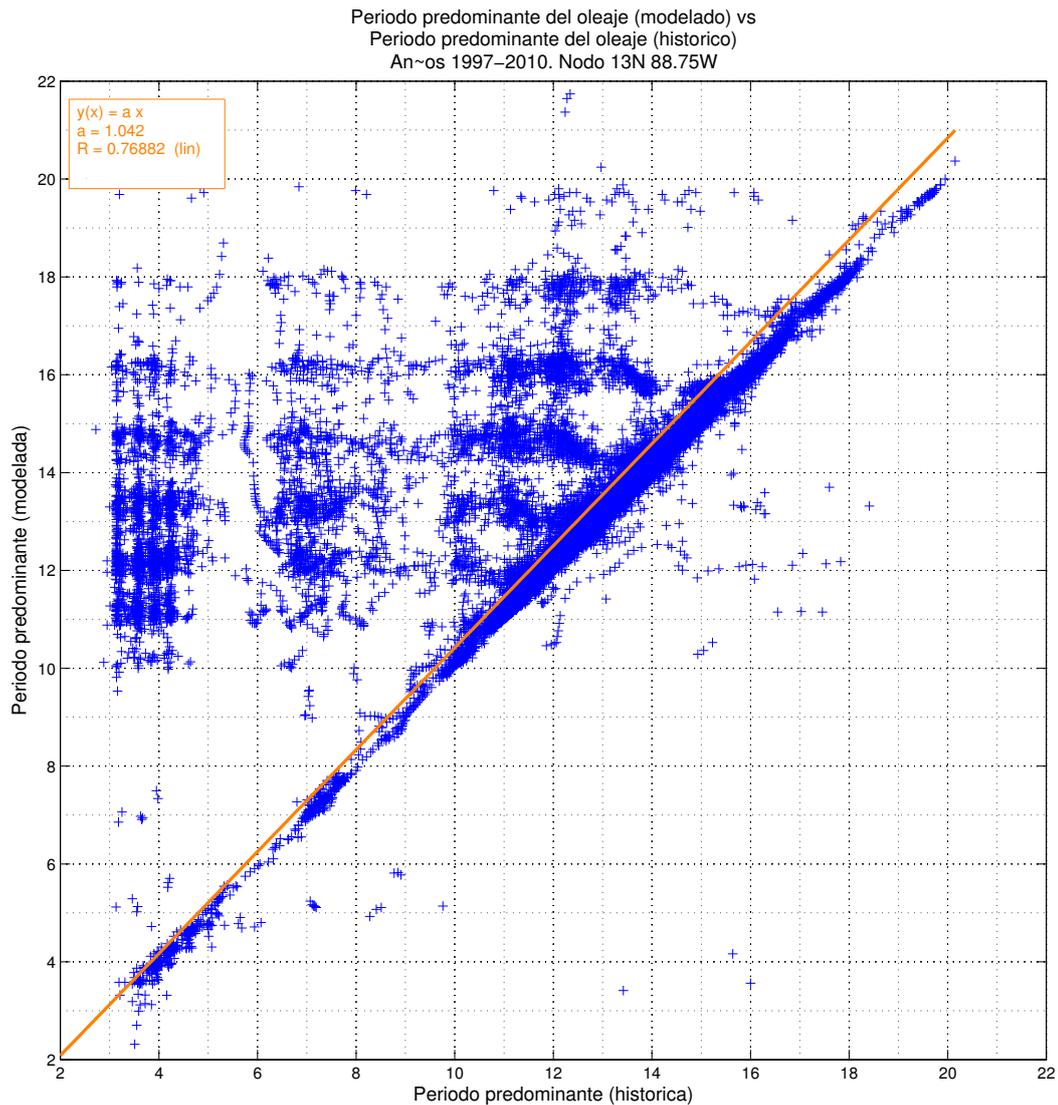


Figura 5.8: Validación de periodo empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

a la forma en cómo corren el modelo en la NOAA (mediante averiguaciones, con Hendrik Tolman, posteriores a las ejecuciones ya realizadas): ejecutan el modelo 4 veces al día. Toman un archivo de reinicio de la predicción actual del ciclo anterior, lo ejecutan para 6 horas con GDAS (Global Data Assimilation System), luego vuelven a usar GFS para la predicción, lo que significa que el modelo tiene un historial “infinito”.

Dirección predominante del oleaje (modelada) vs
Dirección predominante del oleaje (historica).
Años 1997-2010. Nodo 13N 88.75W

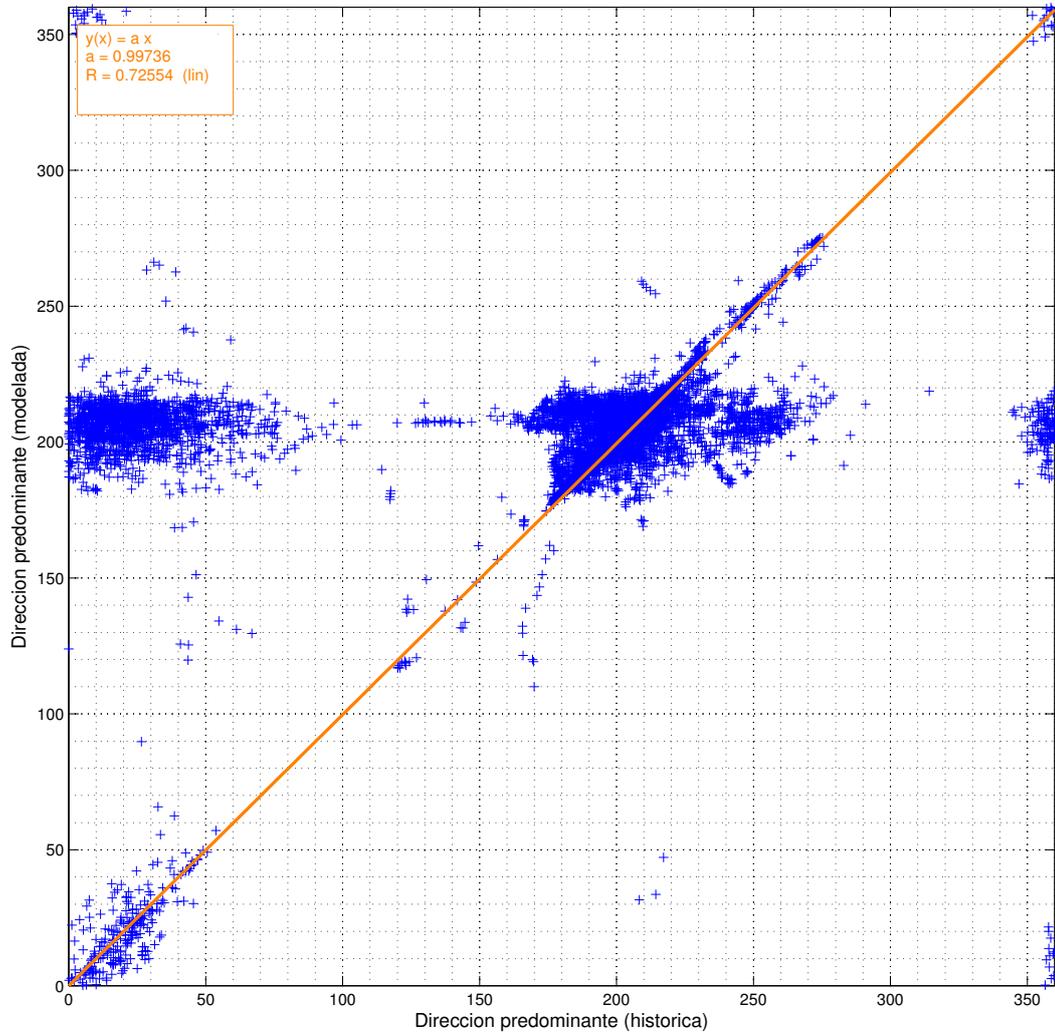


Figura 5.9: Validación dirección empleando WW3 v3.14 vs operacional usando vientos GFS. Años 1997-2010

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

MEDIANTE la implementación de un modelo numérico de oleaje en una estación de trabajo de poca velocidad de procesador, memoria de almacenamiento y con sistema operativo Solaris; fue posible modelar el oleaje frente a las costas de El Salvador, y generar salidas de las magnitudes relacionadas al oleaje.

Con el trabajo de investigación realizado, se obtuvieron resultados consistentes con las salidas del modelo operativo de la NOAA. Resultados presentados como series temporales de parámetros de oleaje (altura significativa, período predominante, período promedio, longitud de onda, dirección promedio, campos cuadrículados (mapas) de dichos parámetros, espectros en función de la frecuencia, espectros direccionales, términos fuente empleando el modelo numérico para oleaje Wavewatch, alimentado con datos de viento a 10 metros de altura, provenientes del modelo climático GFS, con lo cual se calcularon valores estadísticos para 14 años, desde febrero de 1997 hasta agosto de 2010. Los estadísticos principales para cada uno de los nodos representativos de aguas profundas y aguas someras se presentan en la siguiente tabla:

Profundidad	Altura significativa (m)	Período (s)	Dirección (°)
Profunda (1189m)	1.4	13.5	203.3
Somera (1275m)	1.2	13.6	204.8

Con las series temporales de las principales variables del oleaje, se obtuvo la climatología del oleaje, principalmente se observó que la altura significativa del oleaje frente a las costas de El Salvador mayor en aguas profundas que en aguas someras, pero con períodos predominantes

muy similares tanto en aguas profundas como en aguas someras y dirección principal proveniente mayormente del Suroeste, para ambas profundidades.

Analizando el oleaje frente a las costas de El Salvador en las distintas estaciones mediante las series temporales obtenidas; la altura significativa del oleaje, en aguas profundas, es mayor durante la estación lluviosa que en estación seca; el período es mayor en la época de transición de seca a lluviosa y menor en la época seca; la dirección de la cual proviene el oleaje tiende a cambiar en la época seca, respecto a la época lluviosa.

Las diferencias se deben principalmente a la presencia de tormentas en el norte y en el sur del globo terrestre, durante la estación lluviosa, son predominantes las tormentas en el hemisferio sur del planeta, generando oleaje que viaja prácticamente sin ningún obstáculo a través del Océano Pacífico, mientras que durante la estación seca, las tormentas del hemisferio norte son las predominantes, que son más débiles respecto a las del hemisferio sur. Estos estadísticos por estación del año pueden observarse en la tabla que se muestra a continuación:

Estación	Altura significativa (m)	Período (s)	Dirección (°)
Lluviosa	1.6	14.0	208.4
Lluviosa a seca	1.3	13.2	202.4
Seca	1.1	12.9	197.1
Seca a lluviosa	1.5	14.2	208.0

En aguas someras, el comportamiento de los parámetros que describen el oleaje es similar con los de aguas profundas, excepto, en la dirección, la cual varía más durante época seca que en el resto de las épocas, durante las cuales se mantiene prácticamente constante. Lo anteriormente expuesto puede visualizarse en la siguiente tabla:

Estación	Altura significativa (m)	Período (s)	Dirección (°)
Lluviosa	1.4	13.9	206.2
Lluviosa a seca	1.1	13.3	205.6
Seca	0.9	13.1	202.9
Seca a lluviosa	1.3	14.1	205.7

Existen diferencias comparando los datos modelados en El Salvador respecto a los datos almacenados, principalmente al representar el oleaje local, las corridas en El Salvador para oleaje causado por sistemas locales tienden a ser mejor representados que el oleaje proveniente de los sistemas de tormentas ubicados a distancias lejanas (Pacífico Sur). Posiblemente se deba a la no implementación de un sistema de asimilación de datos, en el que se reincorpore las mediciones de satélites, boyas oceánicas y barcos para una mejor modelación; al esquema de propagación empleado o como fue citado por Hendrik Tolman, principal autor de Wavewatch III, en una lista de

distribución estilo foro, a la presencia de un mar de leva maduro presente en el océano Pacífico, requiriendo mayor tiempo de corrida de la modelación.

6.2. Recomendaciones

Como trabajo adicional a desarrollar para mejorar los resultados se recomienda lo siguiente:

- Calibrar las salidas del modelo con datos de mediciones de boyas reales ubicadas cerca de los nodos analizados.
- Correr el modelo empleando los mismos campos de viento de entrada y batimetría, pero variando los esquemas de propagación, para observar diferencias entre ellas.
- Correr el modelo con una resolución más fina, empleando una batimetría a menor escala y campos de viento de mejor resolución espacial y temporal, a manera de obtener las salidas de las mallas regionales para poder comparar con los datos históricos del modelo operacional regional de la NOAA y tener una mejor climatología del oleaje cerca de las costas salvadoreñas; trabajando con mallas de batimetría anidadas, describiendo así de una manera más precisa el oleaje, puesto que además de tener mas nodos éstos también estarían más cercanos a la costa salvadoreña.
- Validar con las mediciones hechas con los aparatos disponibles en El Salvador, haciendo uso de un modelo para aguas someras como el SWAN por ejemplo.
- Modelar el oleaje retroalimentando el modelo numérico con datos de asimilación, por ejemplo los disponibles del Global Data Assimilation System o GDAS por sus siglas en inglés, esto mejoraría la calibración del modelo y las salidas.

Bibliografía

- Bolaños Sánchez, R., 2007. *Tormentas de oleaje en el Mediterráneo: Física y Predicción*, Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Brown, J., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., & Wright, J., 1997. *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*, The Open University.
- Castro Osuna, D. A., 2003. *Simulación numérica del oleaje en la Bahía de Todos Santos: Influencia de las condiciones de frontera*, UABC.
- Cavaleri, L. et al., 2007. Wave modelling - the state of the art, *Progress in Oceanography*, **75**(4), 603–674.
- Guzmán, J., Mejía, O., & Menjívar, P., 2007. *Evaluación del potencial energético del oleaje en las costas de El Salvador*, UES.
- Halliday, Resnick, & Krane, 2001. *Física*, vol. 1 & 2, Wiley, 5th edn.
- Holthuijsen, L. H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press.
- Kalnay, E. et al., 1996. The ncep/ncar 40-year reanalysis project, *Bulletin of American Meteorological Society*, **77**, 437–470.
- Nappo, C. J., 2002. *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, Academic Press.
- Ocampo, F. J., 1995. *El Oleaje*, chap. 1.
- Pierce, J. R., 1981. *Almost All About Waves*, The Massachusetts Institute of Technology.
- Reddy, M. P. M., 2001. *Descriptive Physical Oceanography*, A. A. Balkema Publishers.
- Sears, Zemansky, Young, H. D., & Freedman, R. A., 2008. *University Physics with Modern Physics*, vol. 1 & 2 of **Addison-Wesley series in physics**, Addison Wesley, 12th edn.

Stewart, R. H., 2007. *Introduction to Physical Oceanography*, Texas A and M University.

Tolman, H. L., 2002. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22*.

Tomczak, M., 2002. *Introduction to physical oceanography*.

Young, I. R., 1999. *Wind Generated Ocean Waves*, vol. 2 of **Ocean Engineering Book Series**, Elsevier.

Apéndice A

Anexos

A.1. Códigos fuente

A.1.1. reanálisis wind.m

```
% -----  
% Rutina para extraer vientos de reanálisis para que lea Wavewatch III  
% Entrada: Archivos en formato NetCDF con campos de viento U y V  
% (lee archivos *.nc)  
% Salidas: Archivo en formato texto con la fecha y hora además de  
% los valores componentes del viento U y V.  
% Grafica la serie temporal del viento  
% Elaborada por Paolo Estrada  
% -----  
  
%fechas en formato datenum(1997,05,13)  
clc  
clear  
close all  
  
tic  
year='2000';  
% Para interpolar los archivos netcdf directamente, con cdo  
% (Climate Data Operators  
% cdo remapbil,r288y181 vwnd.10m.gauss.1998.nc vwnd.10m.gauss.1998.remap.nc  
% Nombre de los archivos con datos de viento en formato NetCDF  
ncfile=['uwnd.10m.gauss.',year,'.remap.nc'];  
ncfilev=['vwnd.10m.gauss.',year,'.remap.nc'];  
% Nombre del archivo con los campos de viento U y V y fechas  
nam=[year,'.txt'];  
% yes/- Crear animacion?  
video='-';  
%regional  
% lons=[140 340];  
% lats=[-80 88];
```

```

% Rango de longitudes y latitudes a extraer
% todo el globo
lons=[0 359];
lats=[-78 78];

% xi=lons(1):0.5:lons(2);
% yi=lats(1):0.5:lats(2);

% Rango de fechas
fechas=[(datenum(str2num(year),1,1)) (datenum(str2num(year),12,31,18,0,0))];

% Abre archivos NetCDF
ncid = netcdf.open(ncfile,'NC_NOWRITE');
ncidv = netcdf.open(ncfilev,'NC_NOWRITE');

% Lee los datos del archivo
xid = netcdf.inqVarID(ncid, 'lon');
yid = netcdf.inqVarID(ncid, 'lat');
tid = netcdf.inqVarID(ncid, 'time');
wid = netcdf.inqVarID(ncid, 'uwnd');
vid = netcdf.inqVarID(ncidv, 'vwnd');

x = netcdf.getVar(ncid, xid,'double');
y = netcdf.getVar(ncid, yid,'double');
time = netcdf.getVar(ncid, tid, 'double');
time = time/24+365;%Tiempo en dn de matlab

% indices dentro del archivo
idxlon = sort(nearestpoint(lons, x))-1;
idxlat = sort(nearestpoint(lats, y))-1;
idxfecha = sort(nearestpoint(fechas, time))-1;
ti=1:idxfecha(2)-idxfecha(1)+1;

% Vectores de coordenadas de la zona
lon = x(idxlon(1)+1:idxlon(2)+1);
lat = y(idxlat(1)+1:idxlat(2)+1);
time = time(idxfecha(1)+1:idxfecha(2)+1);

wind = netcdf.getVar(ncid, wid, [idxlon(1) idxlat(1) idxfecha(1)], ...
[length(lon) length(lat) length(time)],'double');

windv = netcdf.getVar(ncidv, vid, [idxlon(1) idxlat(1) idxfecha(1)], ...
[length(lon) length(lat) length(time)],'double');
% Cierra archivos NetCDF
netcdf.close(ncid)
netcdf.close(ncidv)

% Permuta el orden para que la latitud sea la primer columna
U = permute(wind*0.01+225.45, [2, 1, 3]);
V = permute(windv*0.01+225.45, [2, 1, 3]);
clear wind windv
% U = wind*0.01+225.45;

```

```

% V = windv*0.01+225.45;

% time=interp1(time,ti);
%fechas=datestr(fechas,'yyyymmddHHMMSS');
%jds=datestr(time./24+datenum(00,12,30,00,00,00));
% Convierte el formato de fechas a texto
dates=datestr(time,'yyyymmdd HHMMSS');

% for k=1:max(ti)
%     U(:,:,k)=flipud(U(:,:,k));
%     V(:,:,k)=flipud(V(:,:,k));
% end

% interpola sólo en el tiempo
% xi=1:numel(lon);
% yi=1:numel(lat);
% [XI,YI,II]=meshgrid(xi,yi,ti);
% [X,Y]=meshgrid(x,y);
% U=interp3(U,XI,YI,II);
% V=interp3(V,XI,YI,II);

% interpolar en el tiempo y el espacio
% U=interp3(U);
% V=interp3(V);

% X=interp2(X);
% Y=interp2(Y);

% interpola en el espacio
% [X,Y,T]=meshgrid(lon,lat,ti);
% [XI,YI,II]=meshgrid(0:1.875:358.125,linspace(78.75,-78.75,91),1:1:max(ti));
% U=interp3(X,Y,T,U,XI,YI,II);
% V=interp3(X,Y,T,V,XI,YI,II);

% Matriz vacia para acelerar el proceso de escritura
W=zeros(numel(lat),numel(lon),numel(time));

if video=='yes'
% Grafica en video los vientos
% Necesita el archivo de costa global del USGS (coastline extractor)
% costa=load('costaglobal.dat');
% costa del pacifico
costa=load('costapac.dat');
aviobj = avifile(['wind',year,'.avi'],'compression','None','fps',12,'quality',100);
for k=1:2%max(ti)
    W(:,:,k)=sqrt(U(:,:,k).^2+V(:,:,k).^2);
%     W=flipud(W);
    h=figure(k);
%     contour(x,y,W(:,:,k)); colorbar; hold on
    pcolor(lon,lat,W(:,:,k)); shading interp; hold on
    plot(costa(:,1),costa(:,2), 'Color','white','LineWidth',2); hold on;
    cbarf(W(:,:,k),[2 4 6 8 10 12 14 16 20 22 24 26 30 32 34],'vertical','nonlinear')

```

```

        title({'Velocidad del viento en m/s'; dates(k,:)}, 'FontSize',14)
        xlabel('longitud [grados este]', 'FontSize',12)
        ylabel('latitud [grados norte]', 'FontSize',12)
    %     quiverf(x,y,U(:,:,k),V(:,:,k),'Color','k'); hold on;
    %     set(h,'Position',[100.0 100.0 800 600]);
        set(gca, 'CLim', [0, 34]);
        F(k)=getframe(h);
        aviobj = addframe(aviobj,F(k));
        close
    end
    aviobj = close(aviobj);
    % movie2avi(F,['wind',year,'ene.avi'],'compression','None','fps',12,'quality',100)

else

% Guarda a archivo texto con nombre definido al principio
fid=fopen(nam,'w');
for k=1:max(ti)
    saveascii(dates(k,:),nam,'a') % Necesario crear un archivo vacío (con fopen)
    saveascii(U(:,:,k),nam,'a',2)
    saveascii(V(:,:,k),nam,'a',2)

    %     fprintf(fid,'%c',dates(k,:))
    %     fprintf(fid,'\n')
    %     fprintf(fid,'%1f ',U(:,:,k))
    %     fprintf(fid,'\n')
    %     fprintf(fid,'%1f ',V(:,:,k))
    %     fprintf(fid,'\n')

    %     if k==1
    %         dlmwrite(nam,dates(k,:), 'delimiter','');
    %         dlmwrite(nam,U(:,:,k),'-append','delimiter',' ','precision','%1f');
    %         dlmwrite(nam,V(:,:,k),'-append','delimiter',' ','precision','%1f');
    %     else
    %         dlmwrite(nam,dates(k,:), '-append','delimiter','');
    %         dlmwrite(nam,U(:,:,k),'-append','delimiter',' ','precision','%1f');
    %         dlmwrite(nam,V(:,:,k),'-append','delimiter',' ','precision','%1f');
    %     end
end
fclose(fid)
end
% clear
toc

% Indices correspondientes al nodo 270W, 13N
idx=nearestpoint(270,lon);
idy=nearestpoint(13,lat);

W=zeros(1,max(ti));
for k=1:max(ti)
    W(k)=sqrt(U(idy,idx,k).^2+V(idy,idx,k).^2);
end

```

```

% Grafica la magnitud del viento en 90W, 13N (en realidad es 12.3808N)
% WW=permute(W(idy,idx,:),[3 2 1]);
%
% % WW=interp1(W,7.6749); este si es 13N
% W2=permute(interp1(W,7.6749),[2 1 3]);
% Wnodo=permute(W2(70,1,:),[3 2 1]); clear W2
Wprom=mean(W);
figure(k+1)
plot(W)
title({'Velocidad del viento en el nodo 90W,13N';['Promedio de la serie: ',
num2str(Wprom),' m/s']}, 'FontSize',11)
xlabel('contador de tiempo [sin dimensiones]','FontSize',11)
ylabel('Magnitud [m/s]','FontSize',11)
% % promedio de la serie

% WW=interp1(W2,70);
% W2=permute(WW,[3 2 1]); clear WW

```

A.1.2. readgribwindww3.m

```

% -----
% Rutina para extraer vientos del modelo WW3 operacional de la NOAA
% para forzar el modelo Wavewatch III con estos vientos
% Entrada: Archivos en formato GRIB1 con campos de viento U y V
% con valor de bandera para datos faltantes (lee archivos *.grb)
% Salidas: Archivo en formato texto con la fecha y hora ademas de
% los valores componentes del viento U y V.
% Grafica la serie temporal del viento
%
% Necesita las rutinas libres para leer archivos GRiB de la NOAA
% getgrib y read_grib
% Elaborada por Paolo Estrada
% -----

values=getgrib('nww3.wind.200702.grb','UGRD');
U=values.data;
% pcolor(flipud(values.data(:,:,1)));shading flat;colorbar
values=getgrib('nww3.wind.200702.grb','VGRD');
V=values.data;
grib_struct=read_grib('nww3.wind.200702.grb',-1);

time(225)=0;
for i=1:225;
    time(i)=datenum(grib_struct(1,2*i).stime);
end

dates=datestr(time,'yyyymmdd HHMMSS');
% read_grib('nww3.wind.200702.grb','inv');
% grib_struct=read_grib('nww3.wind.200702.grb',[1 3]);
% A=reshape(grib_struct.fltarray,288,157);

```

```

% id=find(A==max(A));
% A(id)=NaN;
% AA=flipud(permute(A,[2 1]));
% pcolor(AA);shading flat;colorbar
% grib_struct(1,1)
% grib_struct(1,2)
% grib_struct(1,2).pds
% grib_struct(1,1).stime

% Escribe los valores a formato texto
nam='200702.txt';
for k=1:225
    if k==1
        dlmwrite(nam,dates(k,:), 'delimiter',' ');
        dlmwrite(nam,U(:, :,k), '-append', 'delimiter', ' ', 'precision', '%.1f');
        dlmwrite(nam,V(:, :,k), '-append', 'delimiter', ' ', 'precision', '%.1f');
    else
        dlmwrite(nam,dates(k,:), '-append', 'delimiter',' ');
        dlmwrite(nam,U(:, :,k), '-append', 'delimiter', ' ', 'precision', '%.1f');
        dlmwrite(nam,V(:, :,k), '-append', 'delimiter', ' ', 'precision', '%.1f');
    end
    % W(:, :,k)=sqrt(U(:, :,k).^2+V(:, :,k).^2);
end

```

A.1.3. global

Código en lenguaje shell utilizado para correr el modelo numérico Wavewatch-III.

```

#!/bin/sh
# 0. Preparaciones iniciales-----

ww3_env='.wwatch3.env' # archivo de configuracion

grads='yes'           # ejecutar gx_outp y grads [yes/-]
                      # configurar aqui el ambiente GrADS!!

# 0.a variables de configuracion

cd
if [ -f $ww3_env ]
then
    set `grep WWATCH3_DIR $ww3_env` ; shift
    main_dir="$*"
    set `grep WWATCH3_TMP $ww3_env` ; shift
    temp_dir="$*"
else
    echo "*** Set-up file $ww3_env not found ***"
    exit
fi

path_w="$temp_dir"          # work directory

```

```

path_e="$main_dir/exe"          # path for executables
path_a="$main_dir/aux"          # path for gs scripts
path_o="$main_dir/test"        # path for output files

# 0.b Limpieza

# clear
rm -f $path_o/ww3_?????.out
rm -f $path_o/gx_?????.out
rm -f $path_o/log.ww3
rm -f $path_o/test.ww3
rm -f $path_o/tab???.ww3
rm -f $path_o/*.ps

cd $path_w
rm -f *.ww3 *.gs

echo ' ' ; echo ' '
echo '          =====> CORRIDA DE WAVEWATCH III <===== '
echo '                EJECUCION REALIZADA POR                '
echo '                PAOLO ESTRADA                            '
echo '                ===== '
echo ' '

# 1. Pre-procesador de la malla -----

echo ' '
echo '+-----+'
echo '| Preprocesador de malla |'
echo '+-----+'
echo ' '

cat > ww3_grid.inp << EOF
$ Archivo de entrada del preprocesador para malla de WW3
$ -----
'NWW3 global 1x1.25 grados'
$
1.1 0.04177 25 24 0.
$
F T T T F T
$
3600. 1300. 3600. 300.
$
&SBT1 GAMMA = -0.038 /
&MISC FLAGTR = 4, CICE0 = 0.33, CICEN = 0.67 /
END OF NAMELISTS
$
288      157
      1.25      1.00      1.00
      0.00     -78.00      1.00
$
-0.05 25.00 11 -0.1 1 1 '(....)' 'NAME' 'nww3.bot'

```

```

                12 0.001 1 1 '(....)' 'NAME' 'nww3.obs'
                10 3 1 '(....)' 'PART' 'mapsta.inp'
$
    0 0 F
$
    0 0 F
$
    0 0
$
$ Condiciones de frontera del modelo para Centroamerica
    250.00 0.00 0.25 0.00 101
    250.00 0.00 0.00 0.25 80
    250.00 20.00 0.25 0.00 20
$
    0. 0. 0. 0. 0
$
$ Fin del archivo de entrada
EOF

```

```

echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/ww3_grid.out"
$path_e/ww3_grid > $path_o/ww3_grid.out

```

```
rm -f ww3_grid.inp
```

```
# 2. Condiciones iniciales -----
```

```

echo ' '
echo '+-----+'
echo '| Condiciones Iniciales |'
echo '+-----+'
echo ' '

```

```

cat > ww3_strt.inp << EOF
$ Archivo de entrada de las condiciones iniciales de WW3
$ -----
3
$ 2
$
$ 0.0081 0.1 270. 1.0 0. 0. 1. 100. 1. 100.
$ 1
$
$ 0.10 0.01 270. 2 1. 0.5 1. 0.5 2.5
$ 0.040469 0.0001 270. 8 0. 1. 0. 1. 2.5
$
EOF

```

```

echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/ww3_strt.out"
$path_e/ww3_strt > $path_o/ww3_strt.out

```

```
rm -f ww3_strt.inp
```

```
# 2.1 Vientos
```

```

echo ' '
echo '+-----+'
echo '| Condiciones de viento |'
echo '+-----+'
echo ' '

cat > ww3_prep.inp << EOF
$ ----- $
'WND' 'LL' T T
0.000 358.75 288 -78 78 157
'NAME' 3 1 '(..T..)' '(..F..)'
55 '2010w.txt'
0 4 -99.
$ ----- $
EOF

echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/ww3_prep.out"
$path_e/ww3_prep > $path_o/ww3_prep.out

rm -f ww3_prep.inp

# 3. Programa principal -----

echo ' '
echo '+-----+'
echo '| Programa principal |'
echo '+-----+'
echo ' '

t_ini='20091201 000000'
t_end='20100901 000000'
#n_out='11688'
n_out='2200'
t_step='10800'
cat > ww3_shel.inp << EOF
$ Archivo de entrada para el shell de WW3
$ -----
F T
F T
T F
F
F
F
F
$
$t_ini
$t_end
$
1
$
$t_ini $t_step $t_end

```

```

T F T F F   T T T T T   T T T T T   F F F F F   F F F F F   F F F F F   F
$
  $t_ini  $t_step  $t_end
    270.0   13.0  'Acajutla  '
    271.25  13.0  'LaPaz    '
      0.0    0.0  'STOPSTRING'
$
  $t_ini      0    $t_end
  $t_ini  $t_step  $t_end
  $t_ini  $t_step  $t_end
  $t_ini      0    $t_end
$
EOF

```

```

$PATH_e/ww3_shel
rm -f ww3_shel.inp

```

```

echo ' ' ; echo "Archivo de salida log.ww3 dirigido a $PATH_o"
mv log.ww3 $PATH_o/.
if [ -f test.ww3 ]
then
  echo "Archivo de salida test.ww3 dirigido a $PATH_o"
  mv test.ww3 $PATH_o/.
fi

```

```

## 4. Salida en malla-----

```

```

# echo ' '
# echo '+-----+'
# echo '|   Gridded output   |'
# echo '+-----+'
# echo ' '

```

```

## 4.a Regular gridded output

```

```

#cat > ww3_outf.inp << EOF
#$ WAVEWATCH III Grid output post-processing
#$ -----
#  $t_ini $t_step. $n_out
#$
# F F T F F   T F T T F   T T F F F   F F F F F   F F F F F   F F F F F   F
#$
# 3 1
#$
# 1 288 1 157 3 1
#EOF

```

```

# echo "   Screen output routed to $PATH_o/ww3_outf.out"
# $PATH_e/ww3_outf > $PATH_o/ww3_outf.out

```

```

# rm -f ww3_outf.inp

```

```

#mkdir hs
#mv *.hs hs/
#mkdir fp
#mv *.fp fp/
#mkdir wnd
#mv *.wnd wnd/
#mkdir t
#mv *.t t/
#mkdir dir
#mv *.dir dir/
#mkdir dp
#mv *.dp dp/

#

# 5. Salida en puntos -----

echo ' '
echo '+-----+'
echo '| Salida en puntos |'
echo '+-----+'
echo ' '

echo 'Tabla de parametros principales del oleaje en 13N90W'

cat > ww3_outp.inp << EOF
$ WAVEWATCH III Point output post-processing
$ -----
  $t_ini  $t_step.  $n_out
$
  1
  -1
$
  2
$
  2  50
EOF

echo "Salida en pantalla copiada a $path_o/ww3_op_50.out"

$path_e/ww3_outp > $path_o/ww3_op_50.out

echo "Archivo de tabla tab50.ww3 copiado a $path_o"
cp tab50.ww3 $HOME/Dropbox/WW3_Files/Resultados
mv tab50.ww3 $path_o
rm -f ww3_outp.inp

echo 'Tabla de parametros principales del oleaje en 13N88.75W'

cat > ww3_outp.inp << EOF
$ WAVEWATCH III Point output post-processing

```

```

$ -----
  $t_ini  $t_step.  $n_out
$
  2
-1
$
  2
$
  2  51
EOF

echo "Salida en pantalla copiada a $path_o/ww3_op_51.out"

$path_e/ww3_outp > $path_o/ww3_op_51.out

echo "Archivo en tabla tab51.ww3 copiado a $path_o"
cp tab51.ww3 $HOME/Dropbox/WW3_Files/Resultados
mv tab51.ww3 $path_o
rm -f ww3_outp.inp

echo 'Densidades de energia espectrales (en archivo de salida)'

cat > ww3_outp.inp << EOF
$ Post-procesamiento de la salida puntual de WW3
$ -----
  $t_ini  $t_step.  $n_out
$
  1
-1
$
  1
$
  3  0.  0.  33  F
EOF

echo "Salida en pantalla copiada a $path_o/ww3_op_33.out"
$path_e/ww3_outp > $path_o/ww3_op_33.out
rm -f ww3_outp.inp
mv *.spc $path_o/ww3.N13W90_2008_2009.spc

cat > ww3_outp.inp << EOF
$ Post-procesamiento de la salida puntual de WW3
$ -----
  $t_ini  $t_step.  $n_out
$
  2
-1
$
  1
$
  3  0.  0.  34  F

```

```

EOF

echo "Salida en pantalla copiada a $path_o/ww3_op_34.out"
$path_e/ww3_outp > $path_o/ww3_op_34.out
rm -f ww3_outp.inp
mv *.spc $path_o/ww3.N13W88.75_2008_2009.spc

if [ "$grads" = 'yes' ]
then

echo '   Malla espectral con GrADS'

cat > gx_outf.inp << EOF
$ Post-procesamiento de la malla de salida de WW3 (con GrADS)
$ -----
  $t_ini  $t_step.  $n_out
$
  F F T F F   T F T F   T T F F F   F F F F F   F F F F F   F F F F F   F
$
  1 288 1 157 T T
EOF

echo ' '
echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/gx_outf.out"
$path_e/gx_outf > $path_o/gx_outf.out

rm -f gx_outf.inp

ln -s $path_a/colorset.gs .
ln -s $path_a/cbarn.gs .
ln -s $path_a/global.gs
ln -s $path_a/globalTp.gs
ln -s $path_a/globalWind.gs

# Configurar GrADS apropiadamente aqui si es necesario !!!

grads -lc "run globalTp"
#  gxeps -c -i plot.grads -o $path_o/plot.ps
mkdir globalTp
mv *.gif globalTp/

grads -lc "run globalWind"
mkdir globalWind
mv *.gif globalWind/

grads -lc "run global"
mkdir globalHs
mv *.gif globalHs/

#  rm -f *.gs

```

```

rm -f ww3.grads ww3.ct1 plot.grads

echo '   Malla espectral de GrADS'

cat > gx_outf.inp << EOF
$ Post-procesamiento de la malla de salida de WW3 (con GrADS)
$ -----
$   $t_ini  $t_step.  $n_out
$
$   F F T F F   T F T T F   T T F F F   F F F F F   F F F F F   F F F F F   F
$
$   185 225 76 100 T T
EOF

echo ' '
echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/gx_outf.out"
$path_e/gx_outf > $path_o/gx_outf.out

rm -f gx_outf.inp

ln -s $path_a/colorset.gs .
ln -s $path_a/cbarn.gs .
ln -s $path_a/centroTp.gs .
ln -s $path_a/centroHs.gs
ln -s $path_a/centroWind.gs

# Configurar GrADS apropiadamente aqui si es necesario !!!

grads -lc "run centroTp"
mkdir centroamericaTp
mv *.gif centroamericaTp/

grads -lc "run centroHs"
mkdir centroamericaHs
mv *.gif centroamericaHs/

grads -lc "run centroWind"
mkdir centroamericaWind
mv *.gif centroamericaWind/

rm -f *.gs
rm -f ww3.grads ww3.ct1 plot.grads

echo '   Espectro de GrADS'

cat > gx_outp.inp << EOF
$ WAVEWATCH III Point output post-processing (GrADS)
$ -----
$   $t_ini  $t_step.  $n_out
$
$   1

```

```

$
-1
$
  T T T T T
EOF

echo "Salida de pantalla dirigida a $path_o/gx_outp.out"
$path_e/gx_outp > $path_o/gx_outp.out

rm -f gx_outp.inp

ln -s $path_a/colorset.gs .
ln -s $path_a/spec.gs .
ln -s $path_a/source.gs .
echo 'global' > spec_ids
echo 'PRUEBA WAVEWATCH III' >> spec_ids

# Configurar GrADS apropiadamente aqui si es necesario !!!

grads -pc "run spec"

gxeps -c -i plot.grads -o $path_o/spec.ps

rm -f plot.grads

echo ' '
echo ' Fuentes de GrADS'

grads -pc "run source"

gxeps -c -i plot.grads -o $path_o/source.ps

rm -f plot.grads *.gs spec_ids
# rm -f ww3.*

fi

# 6. Fin, limpieza -----

echo ' ' ; echo ' ' ; echo "Archivos en `pwd` : " ; echo ' '
ls -l *.ww3

echo ' ' ; echo "Limpiando `pwd`"
# rm -f *.ww3

echo ' ' ; echo "Archivos en $path_o : " ; echo ' '
cd $path_o
ls -l ww3_?????.out
if [ "$grads" = 'yes' ]
then
  ls -l gx_*.out

```

```

fi
ls -l *.ww3
if [ "$grads" = 'yes' ]
then
    ls -l *.ps
fi

echo ' ' ; echo ' '
echo '          =====> FIN DE WAVEWATCH III <===== '
echo '                EJECUCION REALIZADA POR           '
echo '                PAOLO ESTRADA                     '
echo '                ===== '
echo ' '

# End of ww3_ts1 -----

```

A.1.4. globalTp.gs

Código para elaborar mapas globales de período predominante y dirección usando el paquete GrADS.

```

*
* map2_2.gs      : GrADS wave period and peak direction for ww3_tp2.2
* -----
*               Data set with multiple times expected.
*               Input from ww3.ctl ww3.grads
*               Scripts used :
*               colorset.gs : Sets up shading colors
*
* General set up

'enable print plot.grads'
'set display color white'
'clear'
'run colorset.gs'

gdate="yyyy/mm/dd"
'!date -u "+%Y/%m/%d" > tmp_grads_gdate'
result = read (tmp_grads_gdate)
gdate = sublin(result,2)
'!rm -f tmp_grads_gdate'

* Get the data, loop through times ...

'open ww3'

t = 1
while ( t <= 2200 )

    'set t ' t

```

```

'query time'
gradsdate = subwrld(result,3)
test = substr ( gradsdate, 3, 1 )
if ( test='Z' )
    year = substr ( gradsdate, 9, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 6, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 4, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = '00'
else
    year = substr ( gradsdate, 12, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 9, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 7, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = substr ( gradsdate, 4, 2 )
endif

month= '??'
if (mnth='JAN'); month= '01'; endif;
if (mnth='FEB'); month= '02'; endif;
if (mnth='MAR'); month= '03'; endif;
if (mnth='APR'); month= '04'; endif;
if (mnth='MAY'); month= '05'; endif;
if (mnth='JUN'); month= '06'; endif;
if (mnth='JUL'); month= '07'; endif;
if (mnth='AUG'); month= '08'; endif;
if (mnth='SEP'); month= '09'; endif;
if (mnth='OCT'); month= '10'; endif;
if (mnth='NOV'); month= '11'; endif;
if (mnth='DEC'); month= '12'; endif;

vdate = year '/' month '/' day ' ' hour ':' min 'z'

* Basic plot set up

'set grads off'
'set lon 0 360'
'set lat -78 78'
'set xlint 15'
'set ylint 15'
'set grid on 3 60'
'set mpdraw off'

* 'set parea 1. 7.5 2.5 9.'
'set mproj latlon'

* Land sea and ice map

'set gxout grfill'
'set clevs -0.5 0.5'
'set ccols 63 62 0'

```

```

'd map'

* Plot peak wave periods

'set gxout shaded'
'set clevs 2 4 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21'
'set ccols 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38'
'd peakp'
'run cbarn'

* Plot peak directions

'set gxout vector'
'set cthick 3'
'set arrscl 0.2'
'set arrlab off'
'set ccolor 1'
'd skip(cos(PEAKD),5);skip(sin(PEAKD),5)'

* Text around plot

'set strsiz 0.18'
'set string 1 c 5'
'draw string 5.5 7.7 WAVEWATCH III'

'set strsiz 0.12'
'set string 1 l'
'draw string 0.5 7.3 Retroanalysis global'
'set string 1 r'
'draw string 10.5 7.3 valid ' vdate
'set string 1 c'
'draw string 5.5 1.0 maximo periodo del oleaje (sombreado, s) y
direccion (vector, no a escala)'
'draw string 5.5 7.3 grafico generado por Paolo on ' gdate

* Print this page and clear

if (t<10)
'printim global0000't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 10 & t <100)
'printim global000't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 100 & t <1000)
'printim global00't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 1000 & t<10000)
'printim global0't'.gif gif x1024 y800'
endif

```

```

if (t >= 10000)
'printim global't'.gif gif x1024 y800'
endif

* say 'Hit return for next plot '
* pull go_on
  'clear'
  'set grads off'

  t = t + 1
endwhile

'quit'

* end of globalTp.gs

```

A.1.5. globalWind.gs

Código para elaborar mapas globales de viento y dirección usando el paquete GrADS.

```

*
* map2_2.gs      : GrADS wind speed and direction for ww3_tp2.2
* -----
*               Data set with multiple times expected.
*               Input from ww3.ctl ww3.grads
*               Scripts used :
*               colorset.gs : Sets up shading colors
*
* General set up

'enable print plot.grads'
'set display color white'
'clear'
'run colorset.gs'

gdate="yyyy/mm/dd"
'!date -u "+%Y/%m/%d" > tmp_grads_gdate'
result = read (tmp_grads_gdate)
gdate = sublin(result,2)
'!rm -f tmp_grads_gdate'

* Get the data, loop through times ...

'open ww3'

t = 1
while ( t <= 2200 )

  'set t ' t

```

```

'query time'
gradsdate = subwrld(result,3)
test = substr ( gradsdate, 3, 1 )
if ( test='Z' )
    year = substr ( gradsdate, 9, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 6, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 4, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = '00'
else
    year = substr ( gradsdate, 12, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 9, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 7, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = substr ( gradsdate, 4, 2 )
endif

month= '??'
if (mnth='JAN'); month= '01'; endif;
if (mnth='FEB'); month= '02'; endif;
if (mnth='MAR'); month= '03'; endif;
if (mnth='APR'); month= '04'; endif;
if (mnth='MAY'); month= '05'; endif;
if (mnth='JUN'); month= '06'; endif;
if (mnth='JUL'); month= '07'; endif;
if (mnth='AUG'); month= '08'; endif;
if (mnth='SEP'); month= '09'; endif;
if (mnth='OCT'); month= '10'; endif;
if (mnth='NOV'); month= '11'; endif;
if (mnth='DEC'); month= '12'; endif;

vdate = year '/' month '/' day ' ' hour ':' min 'z'

* Basic plot set up

'set grads off'
'set lon 0 360'
'set lat -78 78'
'set xlint 15'
'set ylint 15'
'set grid on 3 60'
'set mpdraw off'

* 'set parea 1. 7.5 2.5 9.'
'set mproj latlon'

* Land sea and ice map

'set gxout grfill'
'set clevs -0.5 0.5'
'set ccols 63 62 0'
'd map'

```

```

*Plot wind

' set gxout shaded'
' set clevs 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34'
' set ccols 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38'
' d sqrt ( wu*wu + wv*wv )'
' run cbarn'

*Plot wind direction

' set gxout vector'
' set cthick 3'
' set arrscl 0.2'
' set arrlab off'
' set ccolor 1'
' d skip(WU,5);skip(WV,5)'

* Text around plot

' set strsiz 0.18'
' set string 1 c 5'
' draw string 5.5 7.7 WAVEWATCH III'

' set strsiz 0.12'
' set string 1 l'
' draw string 0.5 7.3 Global Winds'
' set string 1 r'
' draw string 10.5 7.3 valid ' vdate
' set string 1 c'
' draw string 5.5 1.0 wind speed (shaded, m/s) and
direction (vector, not scaled)'
' draw string 5.5 7.3 grafico generado por Paolo ' gdate

* Print this page and clear

if (t<10)
'printim global0000't'.gif gif x1152 y864'
endif

if (t >= 10 & t <100)
'printim global000't'.gif gif x1152 y864'
endif

if (t >= 100 & t <1000)
'printim global00't'.gif gif x1152 y864'
endif

if (t >= 1000 & t<10000)
'printim global0't'.gif gif x1152 y864'
endif

```

```

if ( t >= 10000)
'printim global't'.gif gif x1152 y864'
endif

* say 'Hit return for next plot '
* pull go_on
  'clear'
  'set grads off'

  t = t + 1
endwhile

'quit'

* end of global.gs

```

A.1.6. centroHs.gs

Código para elaborar mapas de altura significativa y dirección predominante frente a la costa centroamericana usando el paquete GrADS.

```

*
* map2_1.gs      : GrADS wave heigt and peak direction for ww3_tp2.1
* -----
*               Data set with multiple times expected.
*               Input from ww3.ctl ww3.grads
*               Scripts used :
*               colorset.gs : Sets up shading colors
*
* General set up

'enable print plot.grads'
'set display color white'
'clear'
'run colorset.gs'

gdate="yyyy/mm/dd"
'!date -u "+%Y/%m/%d" > tmp_grads_gdate'
result = read (tmp_grads_gdate)
gdate = sublin(result,2)
'!rm -f tmp_grads_gdate'

* Get the data, loop through times ...

'open ww3'

t = 1
while ( t <= 2200 )

  'set t ' t

```

```

'query time'
gradsdate = subwrdr(result,3)
test = substr ( gradsdate, 3, 1 )
if ( test='Z' )
    year = substr ( gradsdate, 9, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 6, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 4, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = '00'
else
    year = substr ( gradsdate, 12, 4 )
    mnth = substr ( gradsdate, 9, 3 )
    day = substr ( gradsdate, 7, 2 )
    hour = substr ( gradsdate, 1, 2 )
    min = substr ( gradsdate, 4, 2 )
endif

month= '??'
if (mnth='JAN'); month= '01'; endif;
if (mnth='FEB'); month= '02'; endif;
if (mnth='MAR'); month= '03'; endif;
if (mnth='APR'); month= '04'; endif;
if (mnth='MAY'); month= '05'; endif;
if (mnth='JUN'); month= '06'; endif;
if (mnth='JUL'); month= '07'; endif;
if (mnth='AUG'); month= '08'; endif;
if (mnth='SEP'); month= '09'; endif;
if (mnth='OCT'); month= '10'; endif;
if (mnth='NOV'); month= '11'; endif;
if (mnth='DEC'); month= '12'; endif;

vdate = year '/' month '/' day ' ' hour ':' min 'z'

* Basic plot set up

'set grads off'
'set lon 230 280'
'set lat -3 21'
'set xlint 4'
'set ylint 3'
* 'set xlab %.0f0'
* 'set ylab %.0f0'
'set grid on 3 60'
'set mpdraw off'

* Land sea and ice map

'set gxout grfill'
'set clevs -0.5 0.5'
'set ccols 63 62 0'

```

```

'd map'

* Plot wave heights

'set gxout shaded'
'set clevs 0.5 1 1.5 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15'
'set ccols 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38'
'd hs'
'run cbarn'

'set gxout contour'
'set cthick 1'
'set clevs 0.5 1 1.5 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15'
'set ccolor 60'
'set clab off'
'd hs'
'set grid off'

* Plot peak directions

'set gxout vector'
'set cthick 3'
'set arrscl 0.25'
'set arrlab off'
'set ccolor 1'
'd cos(PEAKD);sin(PEAKD)'

* Text around plot

'set strsiz 0.18'
'set string 1 c 5'
'draw string 5.5 7.7 WAVEWATCH III'

'set strsiz 0.12'
'set string 1 l'
'draw string 0.5 7.3 Retroanalysis Centroamerica'
'set string 1 r'
'draw string 10.5 7.3 valido ' vdate
'set string 1 c'
'draw string 5.5 1.0 Altura significativa de ola (coloreado, m)
y direccion maxima (vector, no a escala)'
'draw string 5.5 7.3 grafico generado el ' gdate

* Print this page and clear

if (t<10)
'printim centroamerica0000't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 10 & t <100)
'printim centroamerica000't'.gif gif x1024 y800'
endif

```

```

if (t >= 100 & t <1000)
'printim centroamerica00't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 1000 & t<10000)
'printim centroamerica0't'.gif gif x1024 y800'
endif

if (t >= 10000)
'printim centroamerica't'.gif gif x1024 y800'
endif

'clear'
'set grads off'

t = t + 1
endwhile

'quit'

* end of map2_1.gs

```

A.1.7. **fourierhs.m**

```

% -----
% Rutina para leer salidas en formato tabla del WW3
% para graficar el periodograma de la serie
% Entrada: Archivos en formato tabla del WW3 con parametros de oleaje
% Salidas: Grafica de la transformada rapida de Fourier
% Elaborada por Paolo Estrada
% -----

% Lee las tablas con los datos en formato texto
data=importdata('tab50_2001.ww3');

Hs=data(:,5); %Vector de datos de altura de oleaje anuales
m=length(Hs); %Longitud de la serie de datos
n=pow2(nextpow2(m)); %Convirtiendo la longitud de la serie al 2do orden

%Datos de periodo y frecuencia de muestreo
dt=10800; %Intervalo de tiempo en segundos
T=m*dt; %Periodo total de la serie
fs=1/dt; %Frecuencia de muestreo
Ny=1/(2*dt); %Frecuencia Nyquist

%Ploteando la senal importada contra el tiempo para corroborar los datos
y=fft(Hs,n); % Transformada Rapida de Fourier de la senal
f=(0:n-1)*(fs/n); % Rango de frecuencias
power=y.*conj(y)/n; % Poder de la fft

```

```

%PERIODOGRAMA
fig= figure('name','Transformada rapida de fourier serie de altura de olas',
'numbertitle','off', 'Position', [0 0 1920 1200] );
plot(f(1:n),power(1:n),'.'); grid minor
xlabel('Frecuencia (Hz)');
xlim([1/T Ny]);
ylabel('Energia Joules/m^2');
title('\bf Periodograma de Energia 13N -88.75E');

```

A.1.8. leeww3spc.m

```

% -----
% Rutina para leer valores del espectro de oleaje modeladas por WW3
% Entrada: Archivos en formato spc del WW3 con parametros de oleaje
% Salidas: Altura significativa, periodo y grafica de rosa de viento
% Elaborada por Paolo Estrada
% -----

clear
filename='ww3.N13W88.75_2008_2009.spc';
ndata=6097;
[lat,lon,depth,freq,dir,dates,Efth,U10,Udir,UC,Cdir,names,gridname,...
nk,nth,np,nvar,varnames,ndateso]=readWWSPC(filename,ndata);
E=permute(Efth,[4 5 1 2 3]);
Hm0=zeros(1,ndata);
Tp=zeros(1,ndata);
Ef=zeros(25,ndata);
for i=1:ndata
[Hm0(i),Tp(i),Ef(:,i),df]=HsTp_from_spectrum2(E(:, :, i),freq,dir);
end
% Rosa de viento
wind_rose(Udir,U10,'dtype','meteo')

```

A.1.9. readnodosgrib.m

```

% leer gribs de ww3
clc; clear

nrecords=8280;
% aqui se cambia la variable a extraer (tp, tp, tp)
var='tp';

grib_struct=read_grib([var,'filtered.grb'],-1);
%%
for j=240:nrecords
grib_struct(1,j).flttarray(grib_struct(1,j).flttarray(:,1)>=9e20,1)=NaN;
end

```

```

tp1390=zeros(nrecords-240,1);
tp138875=zeros(nrecords-240,1);
time=zeros(nrecords-240,1);
for j=240:nrecords

    tp138875(j-239)=grib_struct(1,j).farray(2,1);
    time(j-239)=datenum(grib_struct(1,j).stime);
end

clear grib_struct nrecords i j var

dates=datestr(time,'yyyymmdd HHMMSS'); clear time
save tp.mat
close

```

A.1.10. unirhistoricosnoaa.m

```

% -----
% Rutina para leer comparar las salidas de WW3 operacional
% en NOAA con los modelados en El Salvador
% Entrada: Archivos en formato csv del WW3 con parametros de oleaje
% Salidas: Correlaciones de altura significativa, periodo, direccion
%          e histogramas para cada magnitud
% Elaborada por Paolo Estrada
% -----

close all; clear all; clc
% nodoh=importdata('13N90W.txt');
nodoh=importdata('13N88.75W.csv');

% Extrae las variables de la columnas
Hsh=single(nodoh.data(:,5));
Tph=single(nodoh.data(:,6));
dirh=single(nodoh.data(:,7));
fechahorah=[nodoh.data(:,3) nodoh.data(:,1) nodoh.data(:,2) nodoh.data(:,4)];

% Carga las variables si ya estan en el workspace
load hs
load dp
load tp

altura=[Hsh;hs1390];
periodo=[Tph;tp1390];
direccion=[dirh;dp1390];

altura(isnan(altura))=0;
periodo(isnan(periodo))=0;
direccion(isnan(direccion))=0;
%%
% data=importdata('tab50_19970201_20100831.wv3');

```

```

data=importdata('tab51_19970201_20100831.wv3');

Hs=single(data.data(:,5).*isfinite(altura));
Tp=single((1./data.data(:,10)).*isfinite(periodo));
dir=single(data.data(:,11).*isfinite(direccion));
clear data

%%
close all
% scrsz = get(0,'ScreenSize');
% figure('Position',[1 scrsz(4)/2 scrsz(3)/2 scrsz(4)/2])

% Grafica altura, periodo y direccion
figure('Position',[1 1024 1024 1024])
plot(altura,Hs,'Marker','+','LineStyle','none'); grid minor
    title({'Altura significativa del oleaje (modelada) vs';...
        'altura significativa del oleaje (historica)';...
        ['An~os 1997-2010','.' Nodo 13N 90W']}, 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([0 3.6])
    ylim([0 3.6])
    xlabel('Altura significativa (historica)','FontSize',12)
    ylabel('Altura significativa (modelada)','FontSize',12)
    set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
    showfit('affine') % Ajusta curva a los datos
    export_fig 'hscorr13N90W.eps' -eps

figure('Position',[1 1024 1024 1024])
plot(periodo,Tp,'Marker','+','LineStyle','none'); grid minor
    title({'Periodo predominante del oleaje (modelado) vs';...
        'Periodo predominante del oleaje (historico)';...
        ['An~os 1997-2010','.' Nodo 13N 90W']}, 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([2 22])
    ylim([2 22])
    xlabel('Periodo predominante (historica)','FontSize',12)
    ylabel('Periodo predominante (modelada)','FontSize',12)
    set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
    showfit('linear') % Ajusta curva a los datos
    export_fig 'tpcorr13N90W.eps' -eps

figure('Position',[1 1024 1024 1024])
plot(direccion,dir,'Marker','+','LineStyle','none'); grid minor
    title({'Direccion predominante del oleaje (modelada) vs'; ...
        'Direccion predominante del oleaje (historica).';...
        ['An~os 1997-2010','.' Nodo 13N 90W']}, 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([0 360])
    ylim([0 360])
    xlabel('Direccion predominante (historica)','FontSize',12)

```

```

ylabel('Direccion predominante (modelada)', 'FontSize', 12)
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
showfit('linear') % Ajusta curva a los datos
export_fig 'dpcorrl3N90W.eps' -eps

% figure(3)
% plot(Tph, Tp(1:31639), 'Marker', '.', 'LineStyle', 'none'); grid minor
%%
figure('Position', [1 1024 1024 1024])

subplot(3,2,1); hist(Hs, 13);
title({'Altura significativas'; ['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
xlim([0 3.6])
ylim([0 10000])
set(gca, 'XTick', 0:0.3:3.6)
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

subplot(3,2,2); hist(altura, 13);
title({'Altura significativas (historica)'; ...
['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
xlim([0 3.6])
ylim([0 10000])
set(gca, 'XTick', 0:0.3:3.6)
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

subplot(3,2,3); hist(Tp, 12);
xlim([0 22])
set(gca, 'XTick', 0:2:22)
title({'Periodo predominante'; ['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

subplot(3,2,4); hist(periodo, 12);
xlim([0 22])
set(gca, 'XTick', 0:2:22)
title({'Periodo predominante (historico)'; ...
['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

subplot(3,2,5); hist(dir, 13)
xlim([0 360])
set(gca, 'XTick', 0:30:360)
title({'Direccion predominante'; ['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

subplot(3,2,6); hist(direccion, 13)
xlim([0 360])
set(gca, 'XTick', 0:30:360)
title({'Direccion predominante (historica)'; ...
['An~os 1997-2010', '. Nodo 13N 90W']})
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background

% Convierte figura a formato eps (amigable con LaTeX)

```

```
export_fig 'Histo_compare_90W.eps' -eps
```

A.1.11. leetabww3.m

```
%  
% Rutina para procesar las salidas de Wavewatch III  
% Entrada: Archivos en tablas con las salidas de parametros de oleaje  
% del modelo WW3 (lee archivos tab*.ww3)  
% Salida: graficos de serie temporales de los datos, histogramas,  
% correlaciones entre los parametros, periodogramas, rosas de oleaje y viento  
  
close all; clear all; clc  
% Importa archivo de texto con los datos de salida de WW3  
data=importdata('tab50_19970201_20100831.ww3');  
% Utiliza las rutinas externas hms2days y doy2date  
% y la rutina externa round2 para redondear a los decimales deseados  
% An~o inicial y An~o final  
year_ini='1997';  
year_end='2010';  
% ano=zeros(numel(dias),1)+year;  
% [~,mes]=month(doy2date(dias,ano));  
% dates(:)=[data.data(:,1) '-' data.data(:,2) ':'...  
data.data(:,3) ':' data.data(:,4)];  
% dates=datenum([data.data(:,1),data.data(:,2)]);  
% Remueve nans de una matriz llamada bot  
% bot(any(isnan(bot)'),:)=[];  
% intervalo=1:numel(dias);  
  
[n,m]=size(data.data);  
  
numfechas=linspace(datenum([str2double(year_ini) 2 1 0 0 0]),...  
datenum([str2double(year_end) 8 31 21 0 0]),n);  
dates=datestr(numfechas);  
% rango de anos de los datos  
finanhos=[datenum([1997 2 1 0 0 0]),datenum([1998 1 1 0 0 0]),...  
datenum([1999 1 1 0 0 0]),datenum([2000 1 1 0 0 0]),...  
datenum([2001 1 1 0 0 0]),datenum([2002 1 1 0 0 0]),datenum([2003 1 1 0 0 0]),...  
datenum([2004 1 1 0 0 0]),datenum([2005 1 1 0 0 0]),datenum([2006 1 1 0 0 0]),...  
datenum([2007 1 1 0 0 0]),datenum([2008 1 1 0 0 0]),datenum([2009 1 1 0 0 0]),...  
datenum([2010 1 1 0 0 0]),datenum([2010 8 31 21 0 0])]';  
anhos=datestr(finanhos);  
idfinanhos=zeros(numel(finanhos),1);  
for i=1:numel(finanhos)  
idfinanhos(i)=find(numfechas==finanhos(i));  
end  
  
dt=10800; %Intervalo de tiempo en segundos  
fs=1/dt; %Frecuencia de muestreo  
t=(0:n-1)*dt;  
nfft=2^(nextpow2(n)); % transformada rapida de fourier
```

```

%%

% Calcula estadisticos principales
for i=1:numel(finanhos)-1
    dt=idfinanhos(i):1:idfinanhos(i+1)-1;
    Hs=single(data.data(dt,5));
    Tp=single(1./data.data(dt,10));
    dir=single(data.data(dt,11));
    Hmax(i)=round2(max(Hs),0.1);
    Hmin(i)=round2(min(Hs),0.1);
    Hprom(i)=round2(mean(Hs),0.1);
    Hmoda(i)=round2(mode(Hs),0.1);
    Hmed(i)=round2(median(Hs),0.1);
    Hstd(i)=round2(std(Hs),0.1);

    Tmax(i)=round2(max(Tp),0.1);
    Tmin(i)=round2(min(Tp),0.1);
    Tprom(i)=round2(mean(Tp),0.1);
    Tmoda(i)=round2(mode(Tp),0.1);
    Tmed(i)=round2(median(Tp),0.1);
    Tstd(i)=round2(std(Tp),0.1);

    Dmax(i)=round2(max(dir),0.1);
    Dmin(i)=round2(min(dir),0.1);
    Dprom(i)=round2(mean(dir),0.1);
    Dmoda(i)=round2(mode(dir),0.1);
    Dmed(i)=round2(median(dir),0.1);
    Dstd(i)=round2(std(dir),0.1);

% y=fft(Hs,nfft)/n; % Transformada Rapida de Fourier de la senal
% f=fs/2*linspace(0,1,nfft/2+1);
% figure('name','Transformada rapida de fourier altura...
% significativa de olas','numbertitle','off','Position',[0 0 1920 1200]);
% power=2*abs(y(1:nfft/2+1));
% indice=find(power>0.039);
% dias=1./f(indice)/(3600*24);
% plot(f,power);
% set(gca,'XScale','log')
% xlabel('Frecuencia (Hz)');
% title('\bf Periodograma 13N 88.75W');
end

%%

% muestra los estadisticos en tabla
tablaH=[Hmax',Hmin',Hprom',Hmoda',Hmed',Hstd'];
tablaT=[Tmax',Tmin',Tprom',Tmoda',Tmed',Tstd'];
tablaD=[Dmax',Dmin',Dprom',Dmoda',Dmed',Dstd'];
columnformat={'numeric','numeric','numeric','numeric','numeric','numeric'};
g=figure('Position',[200 200 550 300],...
'Name','Hs','NumberTitle','off','MenuBar','none');
uitable('Parent',g,'Position',[0 0 550 300],...
'RowName',anhos(1:14,8:11),'Data',tablaH,...

```

```

        'ColumnName', {'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...
'MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'},'ColumnFormat',columnformat);

g2=figure('Position', [200 200 550 300],...
'Name','Tp','NumberTitle','off','MenuBar','none');
uitable('Parent', g2, 'Position',[0 0 550 300],...
'RowName',anhos(1:14,8:11), 'Data', tablaT,...
'ColumnName', {'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...
'MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'},'ColumnFormat',columnformat);

g3=figure('Position', [200 200 550 300],...
'Name','Dir','NumberTitle','off','MenuBar','none');
uitable('Parent', g3, 'Position',[0 0 550 300],...
'RowName',anhos(1:14,8:11), 'Data', tablaD,...
'ColumnName', {'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...
'MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'},'ColumnFormat',columnformat);

%%
% Vuelve a extraer y
% Calcula los estadisticos estacionales
% Estadisticos de direccion
clear Hs Tp dir

Hs=single(data.data(:,5));
Tp=single(1./data.data(:,10));
dir=single(data.data(:,11));

fechasvec=datevec(dates);
%%
idlluviosa=find((fechasvec(:,2))>=6 & (fechasvec(:,2))<=10));
idseca=find((fechasvec(:,2))<=4 | (fechasvec(:,2))==12));
idsecaalluviosa=find(fechasvec(:,2)==5);
idlluviosaaseca=find(fechasvec(:,2)==11);

H1lmax=round2(max(Hs(idlluviosa)),0.1);
H1lmin=round2(min(Hs(idlluviosa)),0.1);
H1lprom=round2(mean(Hs(idlluviosa)),0.1);
H1lmoda=round2(mode(Hs(idlluviosa)),0.1);
H1lmed=round2(median(Hs(idlluviosa)),0.1);
H1lstd=round2(std(Hs(idlluviosa)),0.1);

Hsmax=round2(max(Hs(idseca)),0.1);
Hsmin=round2(min(Hs(idseca)),0.1);
Hsprom=round2(mean(Hs(idseca)),0.1);
Hsmoda=round2(mode(Hs(idseca)),0.1);
Hsmed=round2(median(Hs(idseca)),0.1);
Hsstd=round2(std(Hs(idseca)),0.1);

Hslmax=round2(max(Hs(idsecaalluviosa)),0.1);
Hslmin=round2(min(Hs(idsecaalluviosa)),0.1);
Hslprom=round2(mean(Hs(idsecaalluviosa)),0.1);
Hslmoda=round2(mode(Hs(idsecaalluviosa)),0.1);

```

```

Hslmed=round2 (median (Hs (idsecaalluviosa)), 0.1);
Hslstd=round2 (std (Hs (idsecaalluviosa)), 0.1);

Hlsmax=round2 (max (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);
Hlsmin=round2 (min (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);
Hlsprom=round2 (mean (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);
Hlsmoda=round2 (mode (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);
Hlsmed=round2 (median (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);
Hlsstd=round2 (std (Hs (idlluviosaaseca)), 0.1);

tablaHes=[Hllmax, Hllmin, Hllprom, Hllmoda, Hllmed, Hllstd; ...
Hlsmax, Hlsmin, Hlsprom, Hlsmoda, Hlsmed, Hlsstd; ...
Hsmax, Hsmin, Hsprom, Hsmoda, Hsmed, Hsstd; ...
Hslmax, Hslmin, Hslprom, Hslmoda, Hslmed, Hslstd];

%      tablaDes=[Dllmax', Dllmin', Dllprom', Dllmoda', Dllmed', Dllstd'];

g4=figure('Position', [200 200 650 150], 'Name', ...
'Alturas significativas Estacionales', 'NumberTitle', 'off', 'MenuBar', 'none');
uitable('Parent', g4, 'Position', [0 0 650 150], 'RowName', ...
{'lluviosa', 'lluviosa a seca', 'seca', 'seca a lluviosa'}, 'Data', tablaHes, ...
'ColumnName', {'MAXIMO', 'MINIMO', 'PROMEDIO', 'MODA', ...
'MEDIANA', 'DESVIACION|ESTANDAR'}, 'ColumnFormat', columnformat);

% Estadisticos de periodo
Tllmax=round2 (max (Tp (idlluviosa)), 0.1);
Tllmin=round2 (min (Tp (idlluviosa)), 0.1);
Tllprom=round2 (mean (Tp (idlluviosa)), 0.1);
Tllmoda=round2 (mode (Tp (idlluviosa)), 0.1);
Tllmed=round2 (median (Tp (idlluviosa)), 0.1);
Tllstd=round2 (std (Tp (idlluviosa)), 0.1);

Tsmax=round2 (max (Tp (idseca)), 0.1);
Tsmmin=round2 (min (Tp (idseca)), 0.1);
Tsprom=round2 (mean (Tp (idseca)), 0.1);
Tsmoda=round2 (mode (Tp (idseca)), 0.1);
Tsmmed=round2 (median (Tp (idseca)), 0.1);
Tsst=round2 (std (Tp (idseca)), 0.1);

Tslmax=round2 (max (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);
Tslmin=round2 (min (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);
Tslprom=round2 (mean (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);
Tslmoda=round2 (mode (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);
Tslmed=round2 (median (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);
Tslstd=round2 (std (Tp (idsecaalluviosa)), 0.1);

Tlsmax=round2 (max (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);
Tlsmmin=round2 (min (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);
Tlsprom=round2 (mean (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);
Tlsmoda=round2 (mode (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);
Tlsmmed=round2 (median (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);
Tlssstd=round2 (std (Tp (idlluviosaaseca)), 0.1);

```

```

    tablaTes=[Tllmax,Tllmin,Tllprom,Tllmoda,Tllmed,Tllstd;...
Tlsmax,Tlsmin,Tlsprom,Tlsmoda,Tlsmed,Tlsstd;...
Tsmax,Tsmin,Tsprom,Tsmoda,Tsmed,Tsstd;...
Tslmax,Tslmin,Tslprom,Tslmoda,Tslmed,Tslstd];

    g5=figure('Position', [200 200 650 150],'Name',...
'Periodos mas energeticos Estacionales','NumberTitle','off','MenuBar', 'none');
    uitable('Parent', g5, 'Position',[0 0 650 150],'RowName',...
{'lluviosa','lluviosa a seca','seca','seca a lluviosa'}, 'Data', tablaTes,...
    'ColumnName', {'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO',...
'MODA','MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'}, 'ColumnFormat', columnformat);

% Estadisticos de direccion
Dllmax=round2(max(dir(idlluviosa)),0.1);
Dllmin=round2(min(dir(idlluviosa)),0.1);
Dllprom=round2(mean(dir(idlluviosa)),0.1);
Dllmoda=round2(mode(dir(idlluviosa)),0.1);
Dllmed=round2(median(dir(idlluviosa)),0.1);
Dllstd=round2(std(dir(idlluviosa)),0.1);

Dsmax=round2(max(dir(idseca)),0.1);
Dsmin=round2(min(dir(idseca)),0.1);
Dsprom=round2(mean(dir(idseca)),0.1);
Dsmoda=round2(mode(dir(idseca)),0.1);
Dsmed=round2(median(dir(idseca)),0.1);
Dsstd=round2(std(dir(idseca)),0.1);

Dslmax=round2(max(dir(idsecaalluviosa)),0.1);
Dslmin=round2(min(dir(idsecaalluviosa)),0.1);
Dslprom=round2(mean(dir(idsecaalluviosa)),0.1);
Dslmoda=round2(mode(dir(idsecaalluviosa)),0.1);
Dslmed=round2(median(dir(idsecaalluviosa)),0.1);
Dslstd=round2(std(dir(idsecaalluviosa)),0.1);

Dlsmax=round2(max(dir(idlluviaaaseca)),0.1);
Dlsmin=round2(min(dir(idlluviaaaseca)),0.1);
Dlsprom=round2(mean(dir(idlluviaaaseca)),0.1);
Dlsmoda=round2(mode(dir(idlluviaaaseca)),0.1);
Dlsmed=round2(median(dir(idlluviaaaseca)),0.1);
Dlsstd=round2(std(dir(idlluviaaaseca)),0.1);

    tablaDes=[Dllmax,Dllmin,Dllprom,Dllmoda,Dllmed,Dllstd;...
Dlsmax,Dlsmin,Dlsprom,Dlsmoda,Dlsmed,Dlsstd;...
Dsmax,Dsmin,Dsprom,Dsmoda,Dsmed,Dsstd;...
Dslmax,Dslmin,Dslprom,Dslmoda,Dslmed,Dslstd];

    g6=figure('Position', [200 200 650 150],'Name',...
'Dirección del olaje Estacional','NumberTitle','off','MenuBar', 'none');
    uitable('Parent',g6,'Position',[0 0 650 150],'RowName',...
{'lluviosa','lluviosa a seca','seca','seca a lluviosa'}, 'Data', tablaDes,...
    'ColumnName', {'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO', 'MODA',...

```

```

'MEDIANA', 'DESVIACION|ESTANDAR'}, 'ColumnFormat', columnformat);
%%
%     Calcula estadisticos mensuales
for i=1:12;
    idmes=find(fechasvec(:,2)==i);
    Hs=single(data.data(idmes,5));
    Tp=single(1./data.data(idmes,10));
    dir=single(data.data(idmes,11));
    Hmax(i)=round2(max(Hs),0.1);
    Hmin(i)=round2(min(Hs),0.1);
    Hprom(i)=round2(mean(Hs),0.1);
    Hmoda(i)=round2(mode(Hs),0.1);
    Hmed(i)=round2(median(Hs),0.1);
    Hstd(i)=round2(std(Hs),0.1);

    Tmax(i)=round2(max(Tp),0.1);
    Tmin(i)=round2(min(Tp),0.1);
    Tprom(i)=round2(mean(Tp),0.1);
    Tmoda(i)=round2(mode(Tp),0.1);
    Tmed(i)=round2(median(Tp),0.1);
    Tstd(i)=round2(std(Tp),0.1);

    Dmax(i)=round2(max(dir),0.1);
    Dmin(i)=round2(min(dir),0.1);
    Dprom(i)=round2(mean(dir),0.1);
    Dmoda(i)=round2(mode(dir),0.1);
    Dmed(i)=round2(median(dir),0.1);
    Dstd(i)=round2(std(dir),0.1);
end

    tablaH=[Hmax',Hmin',Hprom',Hmoda',Hmed',Hstd'];
    tablaT=[Tmax',Tmin',Tprom',Tmoda',Tmed',Tstd'];
    tablaD=[Dmax',Dmin',Dprom',Dmoda',Dmed',Dstd'];
meses={'enero','febrero','marzo','abril','mayo','junio',...
'julio','agosto','septiembre','octubre','noviembre','diciembre'};
    columnformat={'numeric','numeric','numeric','numeric','numeric','numeric'};
    g7=figure('Position',[200 200 550 300],...
'Name','Hs','NumberTitle','off','MenuBar','none');
    uitable('Parent',g7,'Position',[0 0 550 300],'RowName',meses,'Data',tablaH,...
'ColumnName',{'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...
'MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'},'ColumnFormat',columnformat);

    g8=figure('Position',[200 200 550 300],...
'Name','Tp','NumberTitle','off','MenuBar','none');
    uitable('Parent',g8,'Position',[0 0 550 300],'RowName',meses,'Data',tablaT,...
'ColumnName',{'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...
'MEDIANA','DESVIACION|ESTANDAR'},'ColumnFormat',columnformat);

    g9=figure('Position',[200 200 550 300],...
'Name','Dir','NumberTitle','off','MenuBar','none');
    uitable('Parent',g9,'Position',[0 0 550 300],'RowName',meses,'Data',tablaD,...
'ColumnName',{'MAXIMO','MINIMO','PROMEDIO','MODA',...

```

```

'MEDIANA', 'DESVIACION|ESTANDAR'}, 'ColumnFormat', columnformat);

clear data
%%
% Rango de fechas
startDate = single(datetime('02-01-', year_ini));
endDate = single(datetime('8-31-', year_end));
xData = linspace(startDate, endDate, n);

% Lee archivo con datos
nodoh=importdata('13N90W.txt');

n=single(31639);
intervalo=1:1:n;
Hsh=single(nodoh.data(intervalo,5));
Tph=single(nodoh.data(intervalo,6));
dirh=single(nodoh.data(intervalo,7));
fechahorah=[nodoh.data(:,3) nodoh.data(:,1) nodoh.data(:,2) nodoh.data(:,4)];

clear nodoh

xData2 = linspace(startDate, endDate, 37);
xDatah = linspace(datetime('02-01-1997'), datetime('11-30-2007'), n);

%%

% GRAFICA DATOS MODELADOS
scrsz = get(0, 'ScreenSize');
figure('Position', [1 1080 1920 1080])
% figure('Position', [1 scrsz(4) scrsz(3) scrsz(4)])

plot(xData, Hs); grid minor; hold on
title({'Altura significativa del oleaje';...
['An~o ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W'];...
['Promedio de la serie: ', num2str(round2(mean(Hs), 0.1)), ' m']}, 'FontSize', 12)
xlabel('Mes y an~o', 'FontSize', 12)
set(gca, 'XTick', xData2)
datetick('x', 'mmmyy', 'keepticks')
ylim(gca, [min(Hs) max(Hs)])
ylabel('Altura [m]', 'FontSize', 12)
set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
export_fig 'hsfull_90.eps' -eps

figure('Position', [1 1080 1920 1080])
plot(xData, Tp); grid minor
title({'Periodo de la componente mas energetica del oleaje';...
['An~o ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W'];...
['Promedio de la serie: ', num2str(round2(mean(Tp), 0.1)), ' s']}, 'FontSize', 12)
xlabel('Mes y an~o', 'FontSize', 12)
set(gca, 'XTick', xData2)

```

```

    datetick('x','mmyy','kepticks')
%   xlim(gca,[0 n])
    ylim(gca,[min(Tp) max(Tp)])
    ylabel('Periodo [segundos]','FontSize',12)
    set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
    export_fig 'tpfull_90W.eps' -eps

figure('Position',[1 1080 1920 1080])
plot(xData,dir); grid minor
    title({'Direccion del oleaje';['An-o ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W'];...
        ['Promedio de la serie: ', num2str(round2(mean(dir),0.1)),' deg']}, 'FontSize',12)
    xlabel('Mes y an-o','FontSize',12)
    set(gca,'XTick',xData2)
    datetick('x','mmyy','kepticks')
%   xlim(gca,[0 n])
    ylim(gca,[0 360])
    ylabel('Direccion [grados]','FontSize',12)
    set(gcf, 'Color', 'none'); % Sets figure background
    export_fig 'dpfull_90W.eps' -eps

% GRAFICA DATOS HISTORICOS
%%
figure(10)
plot(xData,h,Hsh); grid minor
    title({'Altura significativa (historica) del oleaje';...
        ['An-o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'];...
        ['Promedio de la serie: ', num2str(round2(mean(Hsh),0.1)),' m']}, 'FontSize',12)
    xlabel('Mes y an-o','FontSize',12)
    set(gca,'XTick',xData2)
    datetick('x','mmyy','kepticks')
    %xlim(gca,[0 n])
    ylim(gca,[min(Hsh) max(Hsh)])
    ylabel('Altura [m]','FontSize',12)

figure(11)
plot(xData,h,Tph); grid minor
    title({'Periodo de la componente mas energetica del oleaje (historico)';...
        ['An-o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'];...
        ['Promedio de la serie: ', num2str(round2(nanmean(Tph),0.1)),' s']}, 'FontSize',12)
    xlabel('Mes y an-o','FontSize',12)
    set(gca,'XTick',xData2)
    datetick('x','mmyy','kepticks')
    ylim(gca,[min(Tph) max(Tph)])
    ylabel('Periodo [segundos]','FontSize',12)

figure(12)
plot(xData,h,dirh); grid minor
    title({'Dirección predominante del oleaje (historica)';...
        ['An-o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'];...
        ['Promedio de la serie: ', num2str(round2(nanmean(dirh),0.1)),' deg']}, 'FontSize',12)
    xlabel('Mes y an-o','FontSize',12)
    set(gca,'XTick',xData2)

```

```

    datetick('x','mmyy','keepticks')
    ylim(gca,[0 360])
    ylabel('Direccion [grados]','FontSize',12)

% GRAFICA CORRELACIONES

figure(13)
plot(Hsh,Hs(1:n),'Marker','.', 'LineStyle','none'); grid minor
    title({'Altura significativa del oleaje (modelada) vs';...
        'altura significativa del oleaje (historica)'};...
['An~o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W']), 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([0 3.6])
    ylim([0 3.6])
    xlabel('Altura significativa (historica)','FontSize',12)
    ylabel('Altura significativa (modelada)','FontSize',12)

figure(14)
plot(Tph,Tp(1:n),'Marker','.', 'LineStyle','none'); grid minor
    title({'Periodo predominante del oleaje (modelado) vs';...
        'Periodo predominante del oleaje (historico)'};...
['An~o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W']), 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([2 22])
    ylim([2 22])
    xlabel('Periodo predominante (historica)','FontSize',12)
    ylabel('Periodo predominante (modelada)','FontSize',12)

figure(15)
plot(dirh,dir(1:n),'Marker','.', 'LineStyle','none'); grid minor
    title({'Dirección predominante del oleaje (modelada) vs'; ...
        'dirección predominante del oleaje (historica).'};...
['An~o ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W']), 'FontSize',12)
    axis equal
    xlim([0 360])
    ylim([0 360])
    xlabel('Dirección predominante (historica)','FontSize',12)
    ylabel('Dirección predominante (modelada)','FontSize',12)

figure(16)
%     nbins=13;
    subplot(2,3,1);hist(Hs,13);
    title({'Histograma de altura significativas';...
['An~os ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W']})
    xlim([0 3.6])
    set(gca,'XTick',0:0.3:3.6)

    subplot(2,3,2);hist(Tp,12);
    xlim([0 22])
    set(gca,'XTick',0:2:22)
    title({'Histograma de periodo predominante';...

```

```

['An~os ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W'])

    subplot(2,3,3);hist(dir,13)
    xlim([0 360])
    set(gca,'XTick',0:30:360)
    title({'Histograma de direccion predominante';...
['An~os ', year_ini, ' - ', year_end, '. Nodo 13N 88.75W'])

    subplot(2,3,4);hist(Hsh,13);
    title({'Histograma de altura significativas (historica)';...
['An~os ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'])
    xlim([0 3.6])
    set(gca,'XTick',0:0.3:3.6)

    subplot(2,3,5);hist(Tph,12);
    xlim([0 22])
    set(gca,'XTick',0:2:22)
    title({'Histograma de periodo predominante (historico)';...
['An~os ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'])

    subplot(2,3,6);hist(dirh,13)
    xlim([0 360])
    set(gca,'XTick',0:30:360)
    title({'Histograma de direccion predominante (historica)';...
['An~os ', year_ini, ' - ', '2007', '. Nodo 13N 88.75W'])

% Periodograma
figure(17)
periodogram(Hs,[],'onesided',1024,1/10800); grid minor

% Rosa de oleaje con altura significativa
figure(18)
wind_rose(dir,Hs,'dtype','meteo');

% Rosa de oleaje con altura periodo
figure(19)
wind_rose(dir,Tp,'dtype','meteo');

```