

Universidad de El Salvador  
Facultad de Ciencias Naturales y Matemática  
Escuela de Física



**Trabajo de Graduación**

Caracterización de la distribución de la energía de las olas en la playa Mizata, La Libertad.

Presentado Por:

**Beatriz Margarita Recinos Rivas**

Para optar al grado de:

**Licenciada en Física**

Asesor:

**MSc. Luis Castillo**

Ciudad Universitaria, 13 de febrero de 2013

# Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la empresa LaGeo S.A de S.V. bajo el proyecto de Prospección de Energía Undimotriz. Se agradece a la Organización no gubernamental: Fundación Tecleña para El Medio Ambiente FUTECSMA, por haber colaborado con la logística de los viajes de campo para la realización de la toma de datos. De igual manera agradezco al Ing. Juan Guzmán por su colaboración en la toma de datos y manejo de la maquinaria para instalar el equipo a utilizar.

Agradezco al Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET y a la Gerencia del departamento de Oceanografía por su colaboración en facilitar los datos de oleaje y viento utilizados para validar esta investigación.

Agradezco a mi asesor MSc. Luis Castillo, al Grupo de Investigación del Dr. Carlos Rudamas y a las personas dentro de la Escuela de Física de la Universidad de El Salvador, que me han brindado su apoyo para la realización de este trabajo y para dar a conocer sus resultados a nivel nacional y regional.

A mis compañeros: Benjamín Mendoza, Manuel Barrios y Salvador Campos por su colaboración en el procesamiento de datos.

A mi amiga Michelle Alvarado por su colaboración con la edición de algunas imágenes de este documento.

Por último pero no menos importante a mi Familia por su incondicional apoyo.

# Autoridades

**Rector: Ing. Mario Roberto Nieto Lovo**

**Secretaria General: Dra. Ana Leticia  
Zavaleta de Amaya**

**Fiscal General: Lic. Francisco Cruz Letona**

**Decano: MSc. Martín Enrique Guerra  
Cáceres**

**Director de Escuela: Lic. Victor Laureano  
Cortéz Lara**

**Secretario de Escuela: Melvyn  
José Hernández Campos**

**Asesor:**

**Firma:**

MSc. Luis Castillo

# Índice general

Lista de figuras	III
Resumen	VI
Introducción	1
<b>1. Marco teórico</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción a la dinámica de oleaje . . . . .	3
1.1.1. Conceptos básicos de teoría ondulatoria . . . . .	3
1.1.2. Tipos de ondas marinas . . . . .	4
1.1.3. Mar con agitación eólica totalmente desarrollada . . . . .	6
1.2. Teoría Lineal de olas superficiales . . . . .	7
1.2.1. Relación de dispersión . . . . .	8
1.2.2. Velocidad de la ola . . . . .	8
1.2.3. Velocidad de grupo . . . . .	11
1.2.4. Energía . . . . .	11
1.2.5. Altura significativa de la ola . . . . .	11
1.2.6. Refracción de las olas y la distribución de la energía en la costa . . . . .	12
1.3. Ondas y el concepto de un espectro de onda. . . . .	14
1.3.1. Muestreo de la superficie del mar . . . . .	15
1.3.2. Calculo del espectro de onda . . . . .	15
1.4. Antecedentes . . . . .	17
<b>2. Metodología</b>	<b>21</b>
2.1. Diseño Experimental . . . . .	21
2.2. Dispositivo ADV Tritón: Principios de operación. . . . .	22
2.2.1. Funcionamiento del sensor Tritón ADV . . . . .	24
2.3. Método PUV . . . . .	25
2.4. Análisis de Datos . . . . .	29
2.4.1. Transformada Rápida de Fourier o FFT . . . . .	29
2.4.2. Auto correlación y correlación cruzada . . . . .	31
2.4.3. Función de Transferencia . . . . .	31
2.4.4. Altura y periodo de la ola . . . . .	32
2.4.5. Dirección y estimación del espectro direccional . . . . .	33

2.4.6. Cálculo de la Potencia del oleaje . . . . .	34
<b>3. Discusión y análisis de resultados</b>	<b>35</b>
3.1. Descripción de los datos a analizar . . . . .	35
3.2. Lectura de Datos . . . . .	36
3.3. Densidad espectral vs. Frecuencia (FFT) . . . . .	38
3.4. Espectros direccionales para los años 2010 y 2011 . . . . .	39
3.5. Alturas significativas . . . . .	47
3.6. Periodos energéticos de las olas. . . . .	48
3.7. Potencial energético de las olas para los años 2010 y 2011 . . . . .	49
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>50</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	50
4.2. Recomendaciones . . . . .	51
<b>Bibliografía</b>	<b>52</b>
<b>A. Ubicación de la sonda en zona de estudio</b>	<b>54</b>
<b>B. Ubicación del anemómetro en zona de estudio</b>	<b>55</b>
<b>C. Gráficas de la dirección del viento para la estación más cercana a Mizata, Estación T6. Datos obtenidos del SNET.</b>	<b>56</b>

# Índice de figuras

1.1.	Perfil vertical de dos ondas sucesivas de mar idealizadas, mostrando su dimensión lineal y su forma sinusoidal. Modificada y tomada de [9]. . . . .	3
1.2.	Tipos de olas superficiales. La gráfica muestra la relación entre longitud de onda, frecuencia, periodo, cantidad energía y la naturaleza de las fuerzas que originan cada tipo de ola. Modificada y tomada de [8]. . . . .	5
1.3.	Condiciones características de un Fetch: mientras el viento sopla en un área de mar específica (línea punteada), el tamaño de las olas aumenta, al aumentar la velocidad del viento, la duración y el tamaño del fetch. Tomada de [10]. . . . .	6
1.4.	Combinación de patrones de interferencia. El patrón de olas observado desde la superficie, es el resultado de una interferencia mixta de varios grupos de olas que se traslapan unas a otras, formando un campo de olas. Tomada de [10]. . . . .	7
1.5.	a) Movimiento de las partículas de agua en aguas profundas (profundidad mayor que $L/2$ ), mostrando una reducción exponencial del diámetro de las órbitas vs. la profundidad. b) Movimiento de las partículas de agua en olas largas de aguas profundas, demostrando el corrimiento de la ola. c) Movimiento de las partículas de agua en olas donde la profundidad es menor que $L/2$ pero mayor que $L/20$ , mostrando ambas cosas: el decaimiento de la forma circular de las órbitas y como éstas se aplanan al tener contacto con el fondo. d) Movimiento de las partículas de agua en aguas someras, demostrando las órbitas aplanadas por el contacto con el fondo y el movimiento de vaivén que se origina. Modificada y tomada de [8].	10
1.6.	Diagrama de dos frentes de onda aproximándose a la costa. Modificada y tomada de [10]. . . . .	13
1.7.	Refracción del tren de olas, convergencia y divergencia. Tomada de [10]. . . . .	13
1.8.	Distribución de la energía del oleaje, en función de la dirección y frecuencia de la ola, mostrando una propagación predominante hacia el Este, la cual es consistente con las observaciones Geográficas. Estudio realizado en La Joya, San Diego, CA. Tomada de [1]. . . . .	17
1.9.	Ejemplos de la estimación del espectro direccional del oleaje calculado usando los siguientes métodos (ordenados en sentido horario a partir del gráfico superior izquierdo): Método Iterativo de Máxima Probabilidad (MIMP), Método Extendido de Máxima Probabilidad (MEMP), Principio Extendido de Máxima Entropía (PEME), Método de la Transformada de Fourier Directa (MTFD). Tomada de [7]	18

1.10.	Media anual, promedio en los meses de verano y promedio en los meses de invierno de seis magnitudes características: energía de las olas $J$ , altura significativa $H_{m0}$ , periodo de la energía $T_{-10}$ , ancho espectral $\epsilon_0$ , dirección de la energía $\theta_j$ , coeficiente de direccionalidad $d_\theta$ . Tomada de [6]. . . . .	19
1.11.	Gráfica del flujo energético en Kw/m vs. Días del mes de Agosto del año 2010, en la playa de Mizata. Tomada de [18]. . . . .	20
2.1.	Fase I: Montaje del Tritón ADV, el cual mide variaciones de presión y velocidad causadas por la ola. Fase II: Partes del instrumento y descarga de datos. Imagen creada por M. Alvarado . . . . .	21
2.2.	Partes del perfilador acústico doppler, Tritón ADV. Imagen creada por M. Alvarado	23
2.3.	Descripción de la Sonda del instrumento Tritón ADV. Tomada y modificada de [16]. . . . .	25
2.4.	Método PUV: La ola de la izquierda se mueve en la dirección de la flecha azul. El máximo en la presión se encuentra debajo de la cresta y la velocidad máxima, en la dirección de la onda, se da también por debajo de la cresta. Tomada de [2].	28
2.5.	Velocidades y presión de olas que se mueven hacia el Este, el valor medio ha sido removido de la señal de presión. Tomada de [2]. . . . .	29
2.6.	Proceso de análisis que seguirá el código en Matlab para obtener el espectro direccional, la altura y el periodo de la ola. . . . .	30
3.1.	Amplitud de las señal de presión y de las componentes de velocidad medidas por el Tritón ADV . . . . .	37
3.2.	Distribución espectral del oleaje de la playa Mizata, para los días del 10 de Febrero al 11 de Marzo 2011. . . . .	38
3.3.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JAN002.tri . . .	39
3.4.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos FEB002.tri . . .	40
3.5.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos MAR002.tri . . .	40
3.6.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos APR002.tri . . .	41
3.7.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JUL002.tri . . .	41
3.8.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos SEP002.tri . . .	42
3.9.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos OCT002.tri . . .	42
3.10.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos NOV002.tri . . .	43
3.11.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos DEC002.tri . . .	43
3.12.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JAN001.tri . . .	44
3.13.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos FEB001.tri . . .	44
3.14.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos MAR001.tri . . .	45
3.15.	Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos DEC001.tri . . .	45
3.16.	Espectro direccional ubicado en el mapa de la zona de estudio. Imagen editada por M. Alvarado . . . . .	46
3.17.	Mapa de las estaciones meteorológicas de El Salvador, dirección de viento. Modificada de [26]. . . . .	46



3.18. Gráfica de la Altura significativa ( $H_{m0}$ ) para los años 2010 y 2011, datos promediados cada 72 hrs. . . . .	47
3.19. Gráfica del periodo energético ( $T_e$ ) de las olas para los años 2010 y 2011, datos promediados cada 72 hrs. . . . .	48
3.20. Potencia del oleaje para los años 2010 y 2011. Se presentan valores promediados cada 72 horas. a)Potencia para series de tiempo tomadas del 12/01/2011 al 03/01/2012. b) Potencia para series de tiempo tomadas del 21/01/2010 al 07/01/2011. . . . .	49
A.1. Ubicación de la sonda Tritón ADV: específicamente en la zona costera de la playa Mizata, departamento de La libertad, ubicada en las coordenadas 13°30'08,07"latitud Norte y 89°33'51,5" longitud Oeste. . . . .	54
B.1. Ubicación del Anemómetro instalado en la playa Mizata específicamente a 13,512072° latitud Norte y 89,600134° longitud Oeste. A 12 m sobre el nivel del mar. . . . .	55
C.1. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Enero. Obtenido de [26]. .	56
C.2. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Febrero. Obtenido de [26].	57
C.3. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Marzo. Obtenido de [26].	57
C.4. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Abril. Obtenido de [26]. .	58
C.5. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Mayo. Obtenido de [26]. .	58
C.6. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Junio. Obtenido de [26]. .	59
C.7. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Julio. Obtenido de [26]. .	59
C.8. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Agosto. Obtenido de [26].	60
C.9. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Septiembre. Obtenido de [26]. . . . .	60
C.10. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Octubre. Obtenido de [26].	61
C.11. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Noviembre. Obtenido de [26]. . . . .	61
C.12. Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Diciembre. Obtenido de [26]. . . . .	62
C.13. Mapa Anual de viento de estaciones Meteorológicas. Obtenido de [26]. . . .	62

# Resumen

Esta investigación presenta resultados de la distribución espectral de la energía del oleaje en función de la frecuencia y dirección de onda[1]. El objetivo principal es caracterizar y cuantificar la energía de las olas en la playa Mizata, departamento de La Libertad, zona ubicada en las coordenadas  $13^{\circ}30'08,07''$  latitud Norte y  $89^{\circ}33'51,5''$  longitud Oeste.

Es importante caracterizar la cantidad de energía que existe en las costas salvadoreñas y tomar en cuenta la frecuencia y la dirección de la componente más energética de las olas, para establecer; si es viable utilizar el oleaje generado por la fuerza del viento como fuente de energía eléctrica.

Para obtener dicha distribución de energía se analizaron series de presión y velocidad, por medio de un código elaborado en Matlab 7.0 que integra funciones de la Directional Wave Spectra Toolbox (DIWASP)[3], el método utilizado para el cálculo del espectro direccional es la Transformada Directa de Fourier (Direct Fourier Transfer Method DF<sub>TM</sub>) [5]. Los resultados muestran una concentración de la energía en el intervalo de frecuencias de 0.06 Hz a 0.1 Hz, con un máximo de densidad espectral en 0.08 Hz. La dirección predominante de la energía es hacia el Noreste consistente con la orientación geográfica de la playa. Los resultados de altura significativa ( $H_{m0}$ ) encontrados varían desde 0.60 metros a 1.5 metros de altura, con un promedio anual de 1.1 metros. Los valores de periodo energético ( $T_e$ ) encontrados oscilan entre los 8.43 segundos a los 20.05 segundos, con un promedio anual de 12.5 segundos. El Potencial energético se encuentra entre los 2.70 y 17 KW/m con un promedio anual de 10.1 KW/m.

# Introducción

Esta investigación tiene como fin cuantificar y caracterizar la distribución de energía del oleaje en una parte de la playa Mizata, específicamente en la zona costera de la playa Mizata, departamento de La libertad, ubicada en las coordenadas  $13^{\circ}30'08.07''$  latitud Norte y  $89^{\circ}33'51.5''$  longitud Oeste. <sup>1</sup> Esto se llevó a cabo analizando series temporales de parámetros oceanográficos que se relacionan directamente con la cantidad de energía contenida por la ola, entre los parámetros considerados están la velocidad de la ola y la altura significativa. Dichos parámetros son obtenidos por medio de un Velocímetro Acústico Doppler (ADV), modelo Tritón ADV, fabricado por la compañía Sontek y propiedad de la empresa LaGeo (empresa con la que se realiza la investigación). La técnica de medida del dispositivo se basa en el corrimiento Doppler de señales acústicas y en el método PUV, cuyo nombre proviene de los parámetros que se miden; presión y las dos componentes horizontal y axial de la velocidad orbital de la ola [1].

Las medidas realizadas dentro de esta investigación han sido analizadas elaborando un código en Matlab 7.0 que integra la herramienta computacional: Directional Wave Spectra Toolbox (DIWASP), la cual obtiene la dirección y altura del oleaje por medio de un análisis de series de tiempo de presión y velocidad, utilizando el método de la transformada directa de Fourier [3].

A partir de datos recolectados durante los años 2010 y 2011 se calculó el espectro direccional del oleaje; el cual determina la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia y la dirección de la ola (en donde se espera que la dirección sea consistente con las observaciones geográficas).

Durante los últimos años los precios de los combustibles han alcanzado valores históricamente altos y con una tendencia creciente, debido a esto, El Salvador no podrá costear producir energía térmica a partir de hidrocarburos en un futuro cercano. Se estima que el precio promedio de la energía en el mercado regulador del sistema durante el primer trimestre del año 2011, osciló entre 143.53-188.54 dólares por MWh. Superando según la SIGET con un 18.8 % el precio observado el año pasado [4].

Por lo tanto los cálculos y análisis de datos que se realicen en esta investigación contribuirán a la prospección del recurso energético en la playa Mizata. Esperando en un futuro

---

<sup>1</sup>Para mapa de la zona ver Apéndice A

ampliar y sistematizar el estudio a más playas del litoral salvadoreño y lograr determinar la factibilidad o no, de la extracción de energía del oleaje. Todo en vista de la necesidad que tiene El Salvador por encontrar un recurso energético renovable, económico y sostenible que aporte a la producción nacional, beneficiando a comunidades o poblaciones costeras que carecen o tienen un servicio de electricidad limitado. Así como también al diseño o elección de un sistema de conversión de energía apropiado para los niveles de potencial energético encontrados en este trabajo.

# Capítulo 1

## Marco teórico

El Marco teórico consta de las siguientes partes: 1. Introducción a los parámetros de oleaje que describen la forma y los tipos de ondas superficiales en el mar. 2. Descripción de la teoría lineal del movimiento de las olas superficiales, conceptos de velocidad, velocidad de grupo, altura significativa y energía; así como también la distribución de dicha energía sobre la costa. 3. El concepto de espectro de las olas, junto con las aproximaciones y herramientas matemáticas necesarias calcular teóricamente la distribución espectral de la energía. 4. Los antecedentes de la investigación.

### 1.1. Introducción a la dinámica de oleaje

#### 1.1.1. Conceptos básicos de teoría ondulatoria

Para comenzar a describir las olas y su movimiento en la superficie del mar, es necesario definir la terminología que describe a una onda. Las dimensiones de una onda de mar idealizada, se representa Figura 1.1.

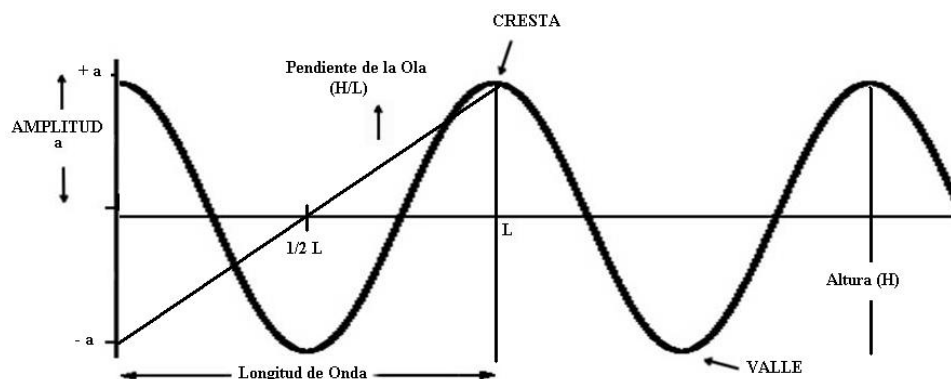


Figura 1.1: Perfil vertical de dos ondas sucesivas de mar idealizadas, mostrando su dimensión lineal y su forma sinusoidal. Modificada y tomada de [9].

En donde la **altura de la ola (H)**, se refiere al cambio vertical total en la altura, entre la cresta de la ola y el valle de la misma. La altura de la onda es dos veces la **amplitud (a)**. **La longitud de onda (L)** es la distancia entre dos picos sucesivos (o dos valles sucesivos). **La pendiente o inclinación**; se define como la altura dividida entre la longitud de onda ( $H/L$ ). Cabe recalcar que no es lo misma que la **pendiente de la superficie del mar**, la cual es la inclinación entre la cresta y el valle de la ola adyacente[8]. Al intervalo de tiempo entre dos picos sucesivos que pasan por un punto dado se le llama **periodo (T)** y al número de picos que pasan en un punto fijo por segundo, se le llama **frecuencia (f)**. Ambos se relacionan por la siguiente ecuación.

$$T = 1/f \quad (1.1)$$

Una onda transfiere una perturbación de una parte del material a otra. Esta perturbación se propaga a través del material sin presentar un movimiento substancial total del mismo, y a su vez, parece propagarse a una velocidad constante. En conclusión lo que se transporta o transfiere a través de una onda es la **Energía**. Al ocurrir dicho fenómeno nos encontramos ante la definición **de un movimiento ondulatorio** [9]. Dos movimientos básicos transportan la energía a través de una ola: el movimiento de las partículas en el agua y el progreso de la ola generada.

### 1.1.2. Tipos de ondas marinas

En general en la teoría ondulatoria existen fundamentalmente dos tipos de ondas: **progresivas** y **estacionarias**. Todas las ondas pueden ser consideradas como ondas progresivas, es decir, como energía que se mueve a través de la superficie de un material. Y la llamada onda estacionaria puede considerarse como la suma de dos ondas progresivas pero viajando en sentido opuesto [8]. En el océano clasificamos a las olas como ondas progresivas, las cuales a su vez se dividen en diferentes tipos de acuerdo a su frecuencia y a lo que las origina. Se distinguen dos tipos principales; las olas **superficiales** y las olas **internas**. Estas últimas, son ondas que viajan a través de un material, es decir, viajan internamente. En el caso del océano son ondas que viajan entre capas de distinta densidad, que se forman por un rápido cambio de densidad con la profundidad conocido como **picnoclina** [10]. Las **olas superficiales** son aquellas que se dan en la interface océano-atmósfera y son causadas por el viento que sopla en la superficie del océano, así como también, por fenómenos climáticos (tormentas tropicales, huracanes, etc.) y gravitatorios (en el caso de las mareas). La mayoría de olas en el océano resultan de una perturbación no periódica del agua, las partículas de agua pierden su posición de equilibrio y luego vuelven a esa posición gracias a una fuerza restauradora. Dicha fuerza, hace que las partículas rebasen hacia ambos lados de su posición de equilibrio, tal desplazamiento y restauración alterna establece la característica de “movimiento oscilatorio”, el cual en su manera más simple tiene un comportamiento sinusoidal como el de la Figura 1.1.

## Tipos de ondas superficiales

En el caso de las olas superficiales existen dos tipos de fuerzas restauradoras; la **fuerza gravitacional** y la **tensión superficial**, que se define como la tendencia de las moléculas de agua a mantenerse juntas y presentar la menor superficie posible al aire [9]. Las olas con una longitud menor a 1.7 cm son conocidas como **olas capilares** [11]. Nuestro interés se enfoca en las olas de longitudes mayores a 1.7 cm en donde la principal fuerza restauradora es la gravedad, por eso se les da el nombre de **olas gravitacionales**. Dentro de las olas gravitacionales se encuentran nuestro objeto de estudio: **las olas generadas por la fuerza del viento**, que según lo muestra la Figura 1.2 son las de mayor contenido energético. Estas ondas se originan cuando dos capas de fluido (agua y viento) se encuentran en contacto teniendo diferente velocidad, la fuerza de fricción entre las capas genera transferencia de momento y energía. La fuerza de fricción provocada por un fluido es proporcional al cuadrado de la velocidad del fluido [8]. Por lo tanto, la fuerza del viento sobre la superficie del mar es proporcional a la velocidad del mismo. A lo largo de la superficie del mar la mayoría de la energía es convertida en olas, pero una pequeña parte también resulta en corrientes de viento.

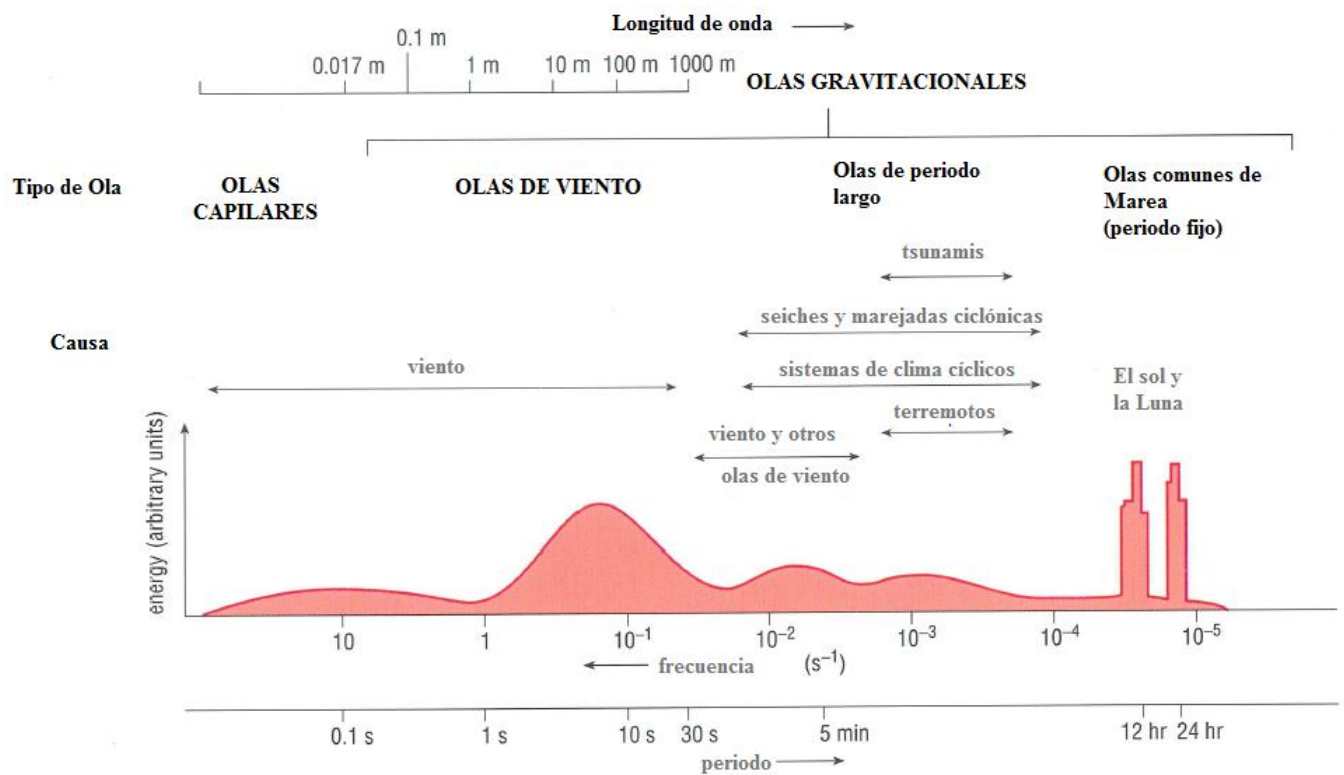


Figura 1.2: Tipos de olas superficiales. La gráfica muestra la relación entre longitud de onda, frecuencia, periodo, cantidad energía y la naturaleza de las fuerzas que originan cada tipo de ola. Modificada y tomada de [8].

### 1.1.3. Mar con agitación eólica totalmente desarrollada

El tamaño de las olas en aguas profundas es debido, no sólo al incremento o variaciones en la velocidad del viento, sino también a la cantidad de tiempo en la que el viento ha soplado a esa velocidad.

El tamaño de las olas depende también del **Fetch**, término que se refiere a la longitud rectilínea de una gran masa de agua superficial que es uniformemente afectada por la dirección y fuerza del viento. Como se observa en la Figura 1.3 [12].

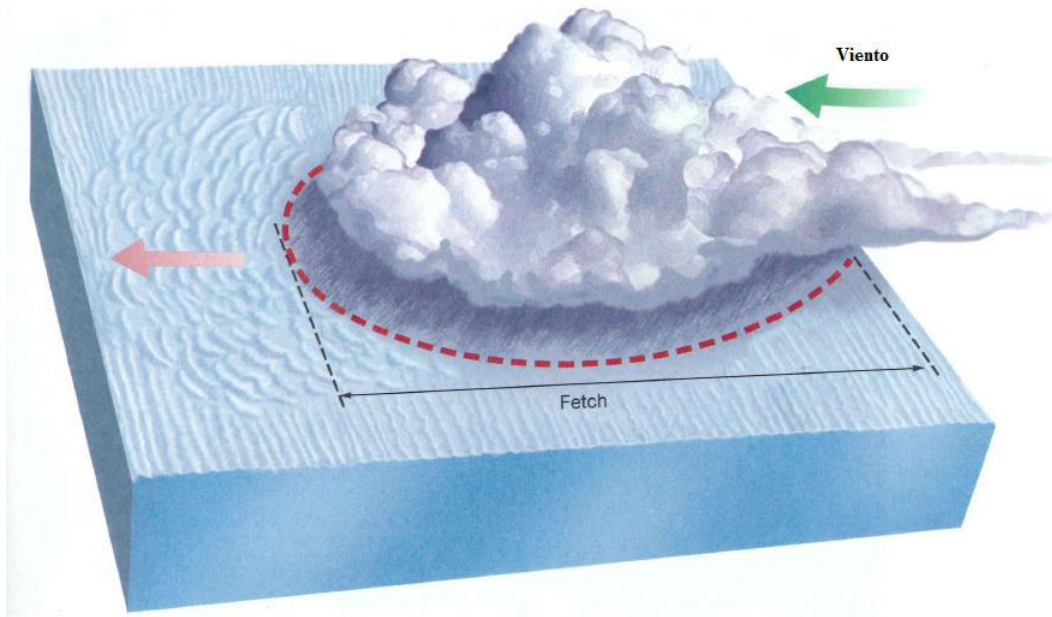


Figura 1.3: Condiciones características de un Fetch: mientras el viento sopla en un área de mar específica (línea punteada), el tamaño de las olas aumenta, al aumentar la velocidad del viento, la duración y el tamaño del fetch. Tomada de [10].

Asumamos que el fetch es suficientemente extenso y que el viento sopla a velocidad constante el tiempo necesario para alcanzar un equilibrio, en el cual, la energía está siendo disipada por las olas a la misma tasa a la que las olas están recibiendo dicha energía del viento. Tal equilibrio se conoce como **mar con agitación eólica totalmente desarrollada** [8]. En este estado las características de las olas no cambian con el tiempo, sin embargo, la velocidad del viento es muy variable, por lo tanto la idea de un mar totalmente desarrollado no es real, y las olas con características uniformes rara vez ocurren en el océano.

Distintas variaciones en la velocidad del viento producen variaciones en el tamaño de las olas, por lo tanto en la práctica, un mar con agitación eólica totalmente desarrollada, consiste en un rango de olas de diferentes tamaños conocido como **campo de olas**.



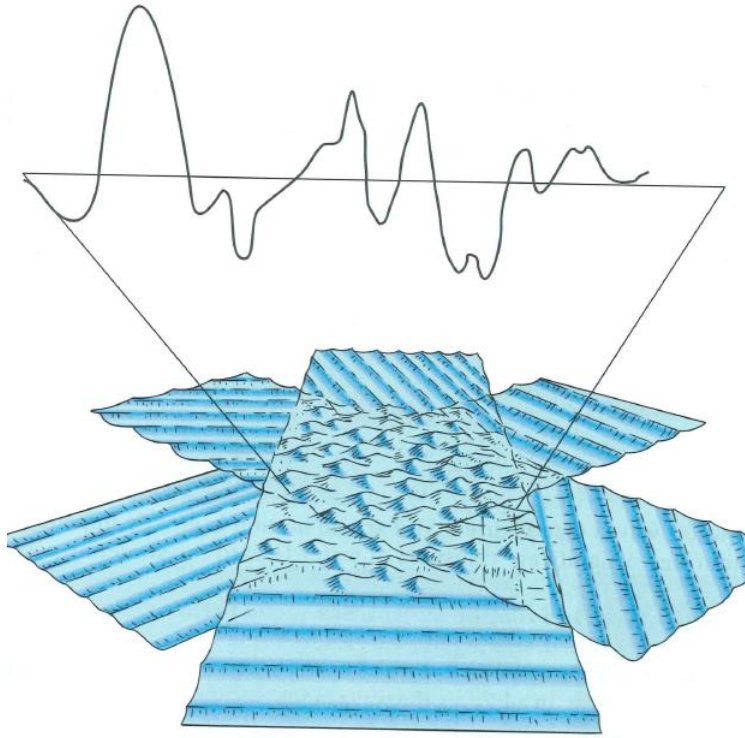


Figura 1.4: Combinación de patrones de interferencia. El patrón de olas observado desde la superficie, es el resultado de una interferencia mixta de varios grupos de olas que se traslapan unas a otras, formando un campo de olas. Tomada de [10].

Diferentes olas que provienen de lugares distantes (como se observa en la Figura 1.4) contribuirán a ese rango de olas de diversos tamaños. A los oceanógrafos les parece conveniente considerar al campo de las olas como un **espectro de energía de olas**[8], en donde la energía contenida por cada ola individual es proporcional al cuadrado de la altura de la ola ( $H$ ). La altura de la ola se cuantifica de acuerdo a un parámetro llamado **altura significativa de la ola ( $H_s$  o  $H1/3$ )**, que se define como la altura media del tercio más alto de todas las olas que pasan por un punto dado en el océano [10].

## 1.2. Teoría Lineal de olas superficiales

Las olas superficiales realmente no presentan un comportamiento lineal. La solución de las ecuaciones de movimiento depende de las condiciones de frontera, es decir, de las condiciones en la superficie del mar, que es precisamente lo que se desea describir y cuantificar en esta investigación. Una de las maneras más sencillas de hacerlo, es asumiendo que la amplitud de las olas en la superficie del mar es infinitamente pequeña, aproximando la superficie a ser plana. Para simplificar la matemática también se asume un fluido bidimensional, con ondas propagándose en la dirección  $x$ , despreciando la fuerza coriolis y la

viscosidad del agua de mar [13]. Con estas aproximaciones, la elevación de la superficie del mar de una ola que viaja en la dirección  $x$  es:

$$\zeta = a * \sin(kx - \omega t) \quad (1.2)$$

con

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}; k = \frac{2\pi}{L} \quad (1.3)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia de la onda en radianes por segundo,  $f$  es la frecuencia de la onda en Hertz (Hz),  $k$  es el número de onda en radianes por metro,  $T$  es el período de la onda en segundos,  $L$  es la longitud de la onda en metros y se asume por las condiciones anteriores que  $ka = O(0)$ . Ambos parámetros el número de onda y la frecuencia angular están relacionados con la naturaleza sinusoidal de la onda de mar idealizada [8].

### 1.2.1. Relación de dispersión

La frecuencia de onda  $\omega$  está relacionada con el número de onda  $k$  por la relación de dispersión:

$$\omega^2 = g * k \tanh(kd) \quad (1.4)$$

Donde  $d$  es la profundidad del agua y  $g$  es la aceleración de la gravedad. Esta relación surge del concepto de velocidad de grupo (sección 1.2.3) propuesta por W.R. Hamilton en 1839 [14].

### 1.2.2. Velocidad de la ola

Tomando en cuenta lo dicho en la sección anterior, existen relaciones matemáticas que vinculan las características de una ola (la longitud de onda, el periodo de la ola, y la altura de la ola) con la velocidad de ésta (en aguas profundas) y con la cantidad de energía que a su vez transporta. Consideremos primero la velocidad de la ola  $c$  (donde la letra  $c$  es usada por el término celeridad de propagación), que puede ser definida como la relación entre la longitud de onda y el periodo de la misma [8]. En otras palabras, una longitud de onda ( $L$ ) tardará un periodo ( $T$ ) en pasar cierto punto. Entonces  $c$  se define como:

$$c = \frac{L}{T} \quad (1.5)$$

Esta es una forma simple que expresa la usual definición de velocidad newtoniana igual a distancia entre tiempo. Tomando en cuenta las relaciones expresadas en la ecuación 1.3 podemos expresar  $c$  en términos de  $k$  y  $\omega$ , de la siguiente manera:

$$c = \frac{\frac{2\pi}{k}}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{1}{k} = \frac{\omega}{k} \quad (1.6)$$

En donde a dicha velocidad se le conoce como **velocidad de fase**. A lo largo de la superficie del océano la velocidad de la ola se ve influenciada por diferentes aspectos. En la Figura 1.5 observamos como el movimiento circular de las partículas de agua en la ola y su velocidad se ven afectados por la profundidad. Por lo tanto, como es de esperarse, en aguas someras la profundidad tiene un efecto en la velocidad de la ola, debido a la interacción del movimiento de las partículas de agua con el fondo del mar.

**La velocidad de la ola obtenida de las ecuaciones anteriores a cualquier profundidad, puede ser expresada como:**

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} + \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} \quad (1.7)$$

Por lo tanto dos aproximaciones son especialmente útiles para los distintos casos de profundidad.

- **Aproximación de aguas profundas:** es válida si la profundidad del agua  $d$  es mucho mayor que la longitud de onda  $L$ . En este caso,  $d \gg L$ , y de la ecuación 1.7.  $kd \gg 1$ , por lo tanto  $\tanh(kd) = 1$ . Y la velocidad de la ola es:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g}{k}} = \frac{g}{\omega} \quad (1.8)$$

- **Aproximación de aguas someras:** es válida si la profundidad del agua es mucho menor que la longitud de onda  $L$ . En este caso,  $d \ll L$ , de la ecuación 1.7.  $kd \ll 1$ , y por lo tanto la  $\tanh(kd)=kd$ . La velocidad queda expresada como:

$$c = \sqrt{gd} \quad (1.9)$$

Esto nos indica, según Stewart [13], que las olas en aguas profundas son ondas dispersivas; debido a que las ondas de longitud mayor viajan más rápido que las ondas de longitud menor. En aguas someras la velocidad de fase es independiente de la ola y depende solamente de la profundidad del mar. Por lo tanto, las olas en aguas someras son no dispersivas.

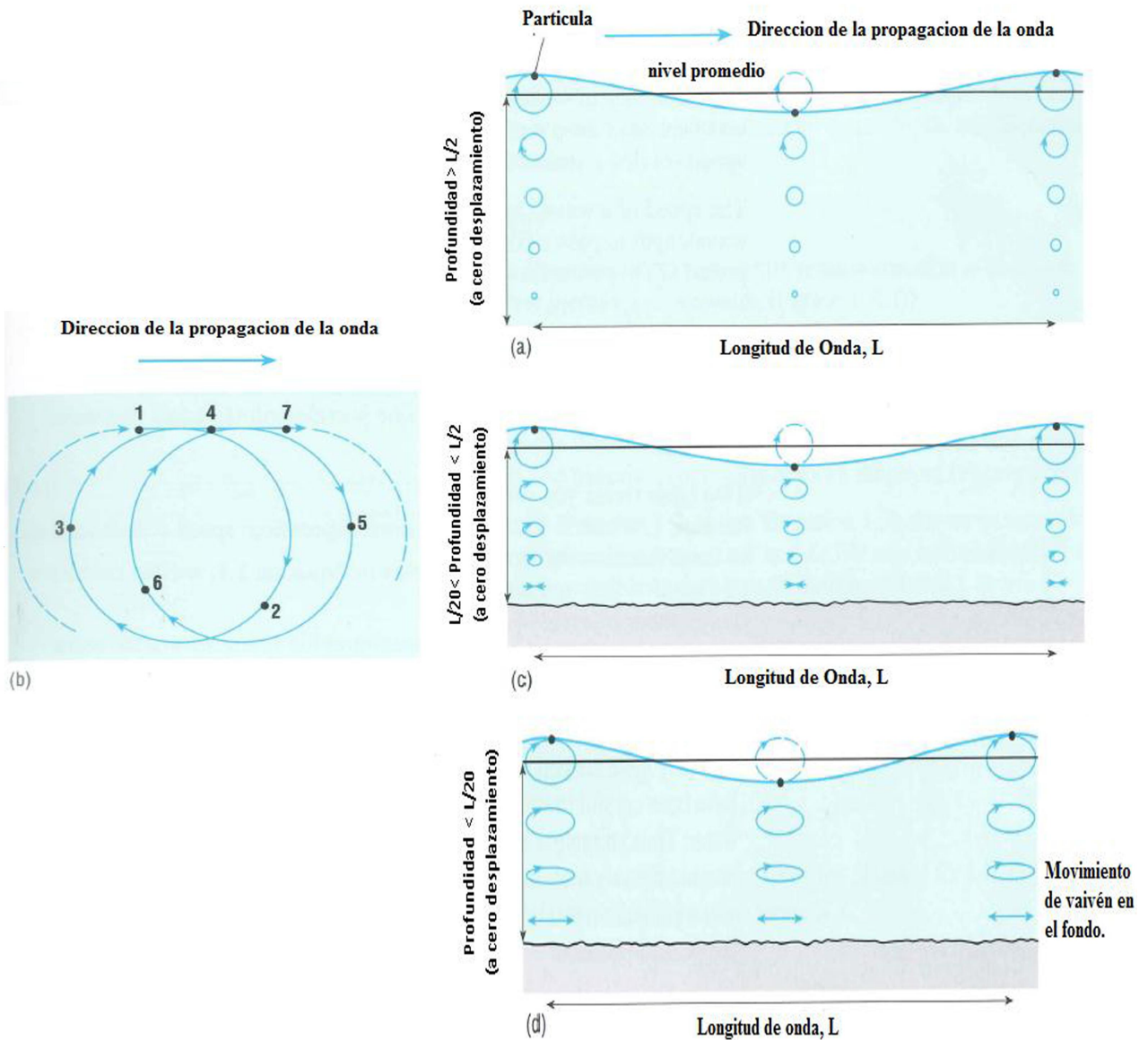


Figura 1.5: a) Movimiento de las partículas de agua en aguas profundas (profundidad mayor que  $L/2$ ), mostrando una reducción exponencial del diámetro de las órbitas vs. la profundidad. b) Movimiento de las partículas de agua en olas largas de aguas profundas, demostrando el corrimiento de la ola. c) Movimiento de las partículas de agua en olas donde la profundidad es menor que  $L/2$  pero mayor que  $L/20$ , mostrando ambas cosas: el decaimiento de la forma circular de las órbitas y como éstas se aplanan al tener contacto con el fondo. d) Movimiento de las partículas de agua en aguas someras, demostrando las órbitas aplanadas por el contacto con el fondo y el movimiento de vaivén que se origina. Modificada y tomada de [8].

### 1.2.3. Velocidad de grupo

El concepto de velocidad de grupo  $c_g$  es fundamental para entender la propagación de ondas lineales y no lineales. La definición de velocidad de grupo en dos dimensiones es:

$$c_g = \frac{\delta\omega}{\delta k} \quad (1.10)$$

Usando las aproximaciones para la relación de dispersión se obtienen:

- Velocidad de grupo en aguas profundas:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{c}{2} \rightarrow \text{dispersivas} \quad (1.11)$$

- Velocidad de grupo en aguas poco profundas:

$$c_g = \sqrt{gd} = c \rightarrow \text{No - dispersivas} \quad (1.12)$$

Es importante hacer notar, que un grupo de olas en aguas profundas se mueve con una velocidad, igual a la mitad de la velocidad con la que avanzan cada una de las ondas que componen el grupo o paquete de ondas [13]. De esto se observa que mientras el grupo de ondas avanza sobre la superficie del océano, ondas individuales entran y salen del grupo.

### 1.2.4. Energía

La energía se encuentra en las olas de dos formas: Cinética; debido al movimiento orbital de las partículas y Potencial; debido a que las partículas de agua son desplazadas de su posición de equilibrio. La energía total (E) por unidad de área, está relacionada con la diferencia de elevación en la superficie del mar ( $\zeta$ ) por medio de la ecuación:

$$E = \rho_w * g * (\zeta^2) \quad (1.13)$$

Donde  $\rho_w$  es la densidad del agua, g es la gravedad y los paréntesis denotan un promedio tiempo o espacio. La energía es contenida dentro del grupo de olas y viaja a la velocidad de grupo. A la tasa con la que se transporta la energía a un lugar en específico, se le llama potencia de la ola y es el producto de la velocidad de grupo con la energía de la onda por unidad de área, expresada por unidad de longitud de cresta de onda.

### 1.2.5. Altura significativa de la ola

Sí observamos el océano vemos olas de distintos tamaños, una definición práctica y a menudo utilizada, es la altura del tercio de ondas de mayor tamaño conocida como **altura significativa**  $H_{1/3}$ . Y se calcula midiendo la altura de la ola en un registro de pocos minutos. Por ejemplo al tomar 120 crestas de onda y registrar sus alturas, se toman las 40 olas más altas y se calcula el promedio. El valor calculado es la  $H_{1/3}$  del registro. La altura

significativa de la ola es calculada de las mediciones del nivel del mar. Si las frecuencias de las olas observadas están comprendidas en una banda de frecuencia angosta,  $H_{1/3}$  está relacionada a la desviación estándar de las mediciones del nivel del mar por medio de:

$$H_{1/3} = 4(\zeta^2)^{1/2} \quad (1.14)$$

Donde  $\langle \zeta^2 \rangle^{1/2}$  es la desviación estándar de las mediciones del nivel del mar. Esta relación es mucho más útil y es ahora la forma aceptada para calcular la altura de ola a partir de las mediciones de sensores de presión, donde  $\zeta = a \sin(kx - \omega t)$  [13]. Por lo tanto podemos reescribir la ecuación 1.13. como:

$$E = \frac{1}{16}(\rho_w * g * H_{1/3}^2) \quad (1.15)$$

### 1.2.6. Refracción de las olas y la distribución de la energía en la costa

Cuando las olas entran en una zona de profundidad relativamente baja definida como la mitad de la longitud de onda, la velocidad de propagación de las olas empieza a depender de la profundidad (Ec. 1.9), haciendo que dicha velocidad disminuya a medida que la profundidad se reduce. Se dice entonces que las olas empiezan a sentir el fondo, lo que da como resultado que gradualmente cambien de dirección, haciéndose las crestas cada vez más paralelas a la costa cuando empiezan a llegar a la zona de playa. Dicho fenómeno es llamado **refracción** y es causado por los cambios en la velocidad de propagación de las ondas en función de la profundidad [15].

La refracción de las olas puede ser descrita por una relación equivalente a la **Ley de Snell**, la cual describe la refracción de los rayos de luz a través de un material de diferente índice de refracción [8]. Para el caso de las olas que se acercan a la costa se piensa en un diagrama como el de la Figura 1.6.

En donde se muestra la relación entre la ola aproximándose a un ángulo  $\theta_1$  a una profundidad de costa  $d_1$ . Debido a que la costa no es uniforme, el frente de onda se verá obligado a pasar por ciertas zonas en donde la profundidad es diferente, en este caso, al pasar por la profundidad  $d_2$  tendrá un ángulo  $\theta_2$  diferente. Dicha relación puede expresarse de la siguiente manera.

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\sqrt{gd_1}}{\sqrt{gd_2}} = \frac{d_1}{d_2} = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \quad (1.16)$$

Usualmente los rayos de ondas convergen o divergen de acuerdo a la geología del lugar. Generalmente convergen en riscos que sobresalen al mar y divergen en bahías o playas con alta deposición de arena, como se muestra en la Figura 1.7. Las olas son refractadas y los rayos de onda muestran como la energía se enfoca en las salientes rocosas donde la erosión es activa. Mientras que la deposición ocurre en las bahías, donde los rayos divergen y la energía de la ola es menor. Las olas tocan fondo y son reducidas primero en aguas someras que en las salientes rocosas.

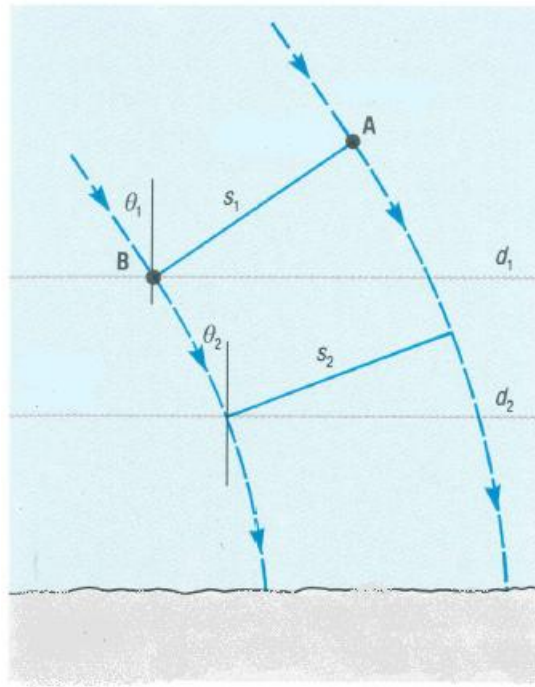


Figura 1.6: Diagrama de dos frentes de onda aproximándose a la costa. Modificada y tomada de [10].

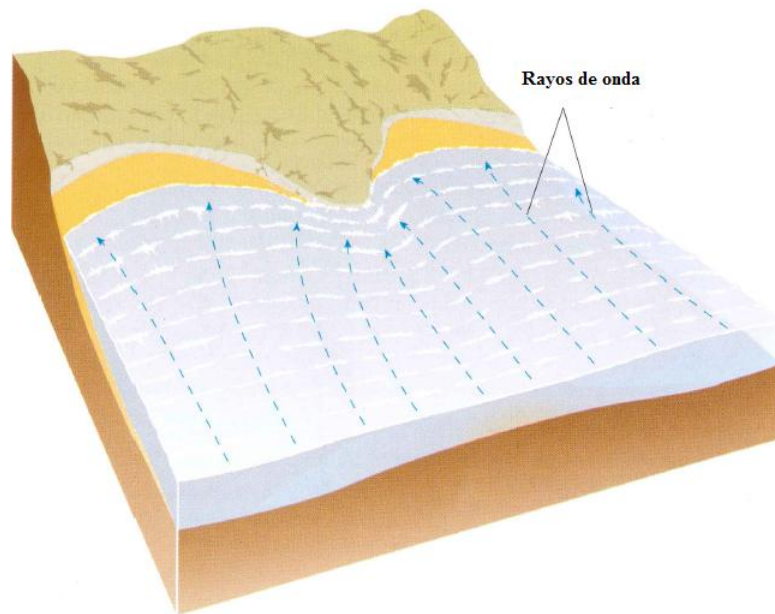


Figura 1.7: Refracción del tren de olas, convergencia y divergencia. Tomada de [10].

### 1.3. Ondas y el concepto de un espectro de onda.

Si observamos el mar nos damos cuenta que las ondas en la superficie no son sinusoidales, la superficie aparenta estar compuesta de ondas al azar que contienen varias longitudes y periodos de onda. La mejor forma para describir esta superficie lleva a pensar en el concepto de espectro de las olas; ya que los espectros dan la distribución de energía de la onda en diferentes frecuencias y longitudes de onda en la superficie del mar. El concepto de un espectro está basado en que casi cualquier función  $\zeta(t)$  o  $\zeta(x)$ , pueden ser representada sobre el intervalo  $-T/2 \leq t \leq T/2$  como la suma de series infinitas de funciones seno y coseno con frecuencias de onda armónicas [13], de la siguiente manera:

$$\zeta(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1} (a_n \cos(2\pi nft) + b_n \sin(2\pi nft)) \quad (1.17)$$

donde a y b están definidos por la integral desde  $-T/2 \leq t \leq T/2$ ,

$$a_n = \frac{2}{T} \int \zeta(t) \cos(2\pi nft) dt, (n = 0, 1, 2...) \quad (1.18)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int \zeta(t) \sin(2\pi nft) dt, (n = 0, 1, 2...) \quad (1.19)$$

Y donde  $f = \frac{1}{T}$  es la frecuencia fundamental y  $nf$  son los armónicos de la frecuencia fundamental.

La ecuación 1.17 puede ser simplificada usando:

$$\zeta(t) = \sum_{n=-\infty} Z_n \exp^{i2\pi nft} \quad (1.20)$$

Donde  $Z_n$  es llamada la **transformada de Fourier de  $\zeta(t)$** .

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

$$S(nf) = Z_n Z_n^* \quad (1.21)$$

Donde  $Z^*$  es el complejo conjugado de  $Z$ .

Podemos extender la idea de las series de Fourier hasta series que puedan representar superficies en dos dimensiones  $\zeta(x, y)$  usando técnicas similares. Por lo tanto cualquier superficie puede ser representada como una serie infinita de funciones seno y coseno orientadas a cualquier dirección. Ahora apliquemos estas ideas a la superficie del mar, la cual puede representarse como dicha suma infinita de funciones seno y coseno [13].



### 1.3.1. Muestreo de la superficie del mar

Para calcular las series de Fourier que representan la superficie del mar, se requiere obtener muestras de la altura del nivel del mar  $\zeta = (x, y, t)$  en un área de diez kilómetros al menos durante una hora. Al digitalizar las salidas del muestreo se obtiene:

$$\zeta_j \equiv \zeta(t_j), t_j \equiv j \Delta \quad j = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (1.22)$$

Donde  $\Delta$  es el intervalo de tiempo entre muestras y  $N$  es el total de muestras. La longitud  $T$  del registro es  $T = N \Delta$ . El intervalo de muestreo  $\Delta$  define a la Frecuencia crítica de Nyquist [13], descrita en la siguiente ecuación:

$$Ny \equiv \frac{1}{2\Delta} \quad (1.23)$$

El registro de onda digitalizado contiene información de ondas en el rango de frecuencias:

$$\frac{1}{T} < f < \frac{1}{2\Delta} \quad (1.24)$$

Donde  $T = N \Delta$  es el tamaño del registro de las series de tiempo y  $f$  la frecuencia en Hertz.

### 1.3.2. Calculo del espectro de onda

La transformada digital de Fourier  $Z_n$  de un registro de onda  $\zeta_j$  equivalente a la ecuación 1.20 es:

$$Z_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \zeta_j \exp \frac{-i2\pi jn}{N} \quad (1.25)$$

$$\zeta_n = \sum_{n=0}^{N-1} Z_j \exp \frac{i2\pi jn}{N} \quad (1.26)$$

El espectro  $S_n$  de  $\zeta$ , el cual es llamado periodograma es:

$$S_n = \frac{1}{N^2} [|Z_n|^2 + |Z_{N-n}|^2] \quad (1.27)$$

Donde  $n=1, 2, \dots, (N/2 - 1)$ . El periodograma promedio se conoce como el espectro de altura de onda o de la energía de la misma (debido a la relación que existe entre energía y altura), el cual da la distribución de la varianza de la altura de la ola como función de la frecuencia. A continuación se presenta un resumen de los pasos para el cálculo de un espectro según Stewart [13] :

- Digitalizar un segmento de las mediciones de altura onda-altura para obtener los límites de la Ecuación 1.24.

- Calcular la transformada de Fourier  $Z_n$
- Calcular el periodograma  $S_n$  de la suma de los cuadrados de la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier.
- Repetir hasta obtener  $M=20$  periodogramas.
- Promediar los 20 periodogramas hasta producir un espectro promedio  $S_m$ .
- La función de distribución estadística de la varianza de altura de onda como función de la frecuencia, es la  $\chi^2$  con  $2M$  grados de libertad.

## 1.4. Antecedentes

Los dispositivos ADV son esenciales para obtener el campo direccional o el espectro direccional del oleaje. Según los manuales de las compañías Sontek [16] y Nortek [17] (compañías pioneras en la fabricación de estos dispositivos), los recién inducidos Acoustic Doppler Current Profilers o ADCP basados en un sistema de haces, son los sensores de mejor desempeño en lo que compete a la recopilación de información sobre la dirección de la ola. En muchos lugares del mundo el estudio de la dinámica de oleaje es ampliamente dominado por los sensores ADV y ADCP, debido al auge y al amplio desarrollo que ha tenido el método acústico Doppler. Los oceanógrafos han hecho de este tipo de instrumento la herramienta principal en sus investigaciones para determinar la velocidad y dirección de las olas.

En el Instituto de Oceanografía Scripps, San Diego CA, se han realizado numerosos estudios de dirección del oleaje. Una investigación importante para nuestro proyecto es la realizada junto con la compañía Sontek, la cual verifica el funcionamiento del Tritón ADV y su capacidad para obtener el espectro direccional del oleaje [1].

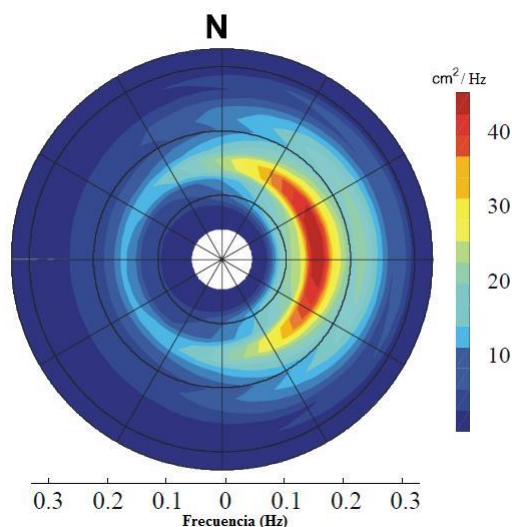


Figura 1.8: Distribución de la energía del oleaje, en función de la dirección y frecuencia de la ola, mostrando una propagación predominante hacia el Este, la cual es consistente con las observaciones Geográficas. Estudio realizado en La Joya, San Diego, CA. Tomada de [1].

En este estudio los autores concluyen que el paquete computacional para estimar la dirección de las olas, el software: SONWAVE PRO, junto con el instrumento ofrecen una solución clave para el monitoreo requerido en estudios aplicados al oleaje costero.

El sistema provee los parámetros claves de la ola como lo son la altura, el periodo y distribución direccional de la energía. Este ultimo parámetro lo observamos en la Figura 1.8 en donde las medidas hechas en la costa de San Diego concuerdan con las observaciones geográficas y estudios previos de la zona. El desempeño del sistema ha sido experimen-

talmente verificado y las pruebas de campo demuestran que los equipos ADV y ADCP resuelven para olas de hasta  $3s$ .

Existen también muchos estudios enfocados en el desarrollo de programas y nuevas herramientas computacionales para procesar datos de dispositivos ADV, ADCP y boyas en general. La compañía Ocean Power Delivery en su investigación [7], presentan distintos métodos matemáticos con los que calculan el espectro direccional. Presentan el desarrollo de un paquete en Matlab para procesar datos de instrumentos ubicados al interior del Pelamis<sup>1</sup> y datos de oleaje medidos con una boya [7]. El espectro direccional de la zona obtenido con los distintos métodos de análisis espectral se observa en la Figura 1.9.

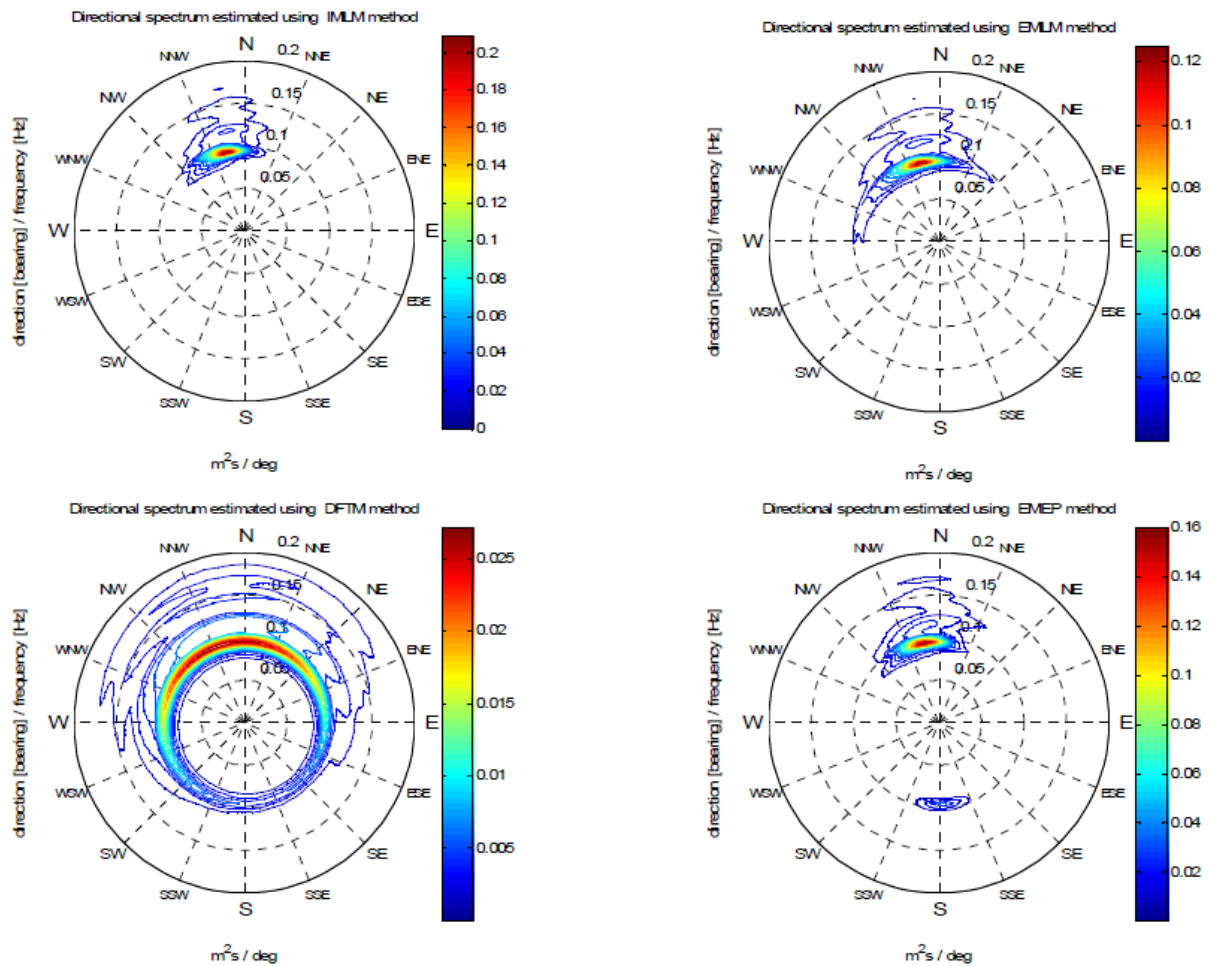


Figura 1.9: Ejemplos de la estimación del espectro direccional del oleaje calculado usando los siguientes métodos (ordenados en sentido horario a partir del gráfico superior izquierdo): Método Iterativo de Máxima Probabilidad (MIMP), Método Extendido de Máxima Probabilidad (MEMP), Principio Extendido de Máxima Entropía (PEME), Método de la Transformada de Fourier Directa (MTFD). Tomada de [7]

<sup>1</sup>Pelamis; una de las estructuras en prueba para la extracción de energía de las olas

Existen otras investigaciones que caracterizan el recurso energético de las olas, como la realizada al Noroeste de los Estados Unidos [6]. Esta investigación utiliza datos de boyas marinas operadas y mantenidas por el National Data Buoy Center y el Coastal Data Information Program. Las series de tiempo medidas se utilizan para calcular los parámetros que caracterizan el estado del mar en periodos de una hora: potencia omnidireccional de las olas, altura significativa, periodo energético, ancho espectral y coeficiente de direccionalidad.

Según estos investigadores para poder diseñar un convertidor de energía eficiente es necesario, no sólo cuantificar el flujo energético de las olas, sino también describir la distribución del flujo de la energía en función de la frecuencia y dirección de onda. Destacan que para lograr entender el recurso energético, es también necesario identificar las tendencias temporales y la variabilidad anual de flujo de energía para el sitio de la investigación [6]. Algunos de los resultados de esta investigación pueden observarse en la Figura 1.10.

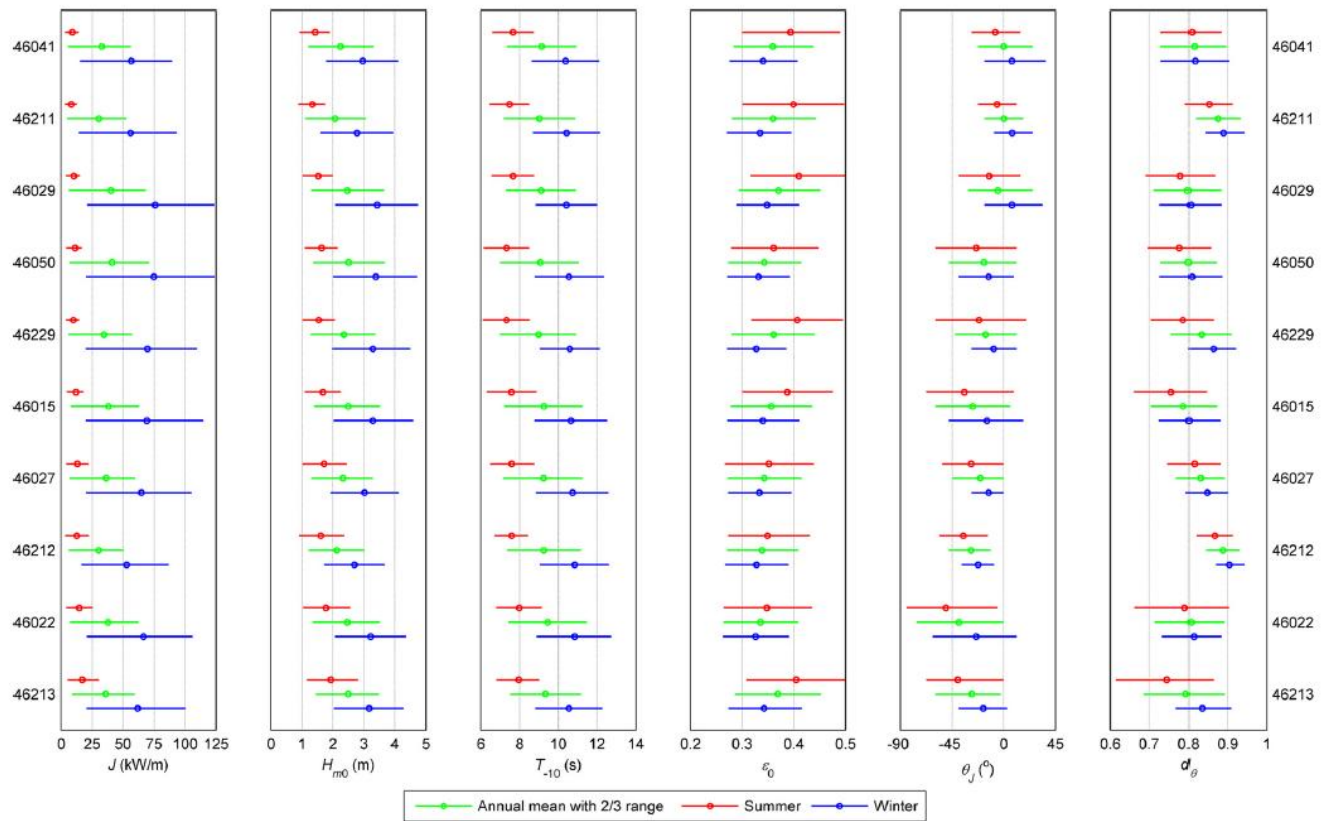


Figura 1.10: Media anual, promedio en los meses de verano y promedio en los meses de invierno de seis magnitudes características: energía de las olas  $J$ , altura significativa  $H_{m0}$ , periodo de la energía  $T_{-10}$ , ancho espectral  $\epsilon_0$ , dirección de la energía  $\theta_j$ , coeficiente de direccionalidad  $d_\theta$ . Tomada de [6].

En El Salvador, es la primera vez que se realiza una investigación del análisis detallado de parámetros de oleaje medidos con un dispositivo Tritón ADV. Este estudio se realiza con el fin de estimar el recurso energético marino y delimitar hacia donde está concentrada la energía del oleaje. Sin embargo, si existen estudios previos de Flujo energético en el país, llevados a cabo con datos obtenidos del mismo dispositivo Tritón ADV.

En Noviembre del 2006, estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de El Salvador, presentaron una propuesta de investigación para adquirir los dispositivos Tritón ADV [18]. En la investigación midieron alturas significativas, para posteriormente obtener la gráfica de flujo energético, esto con la idea de monitorear a lo largo de los años 2008 al 2010 las fluctuaciones de la energía de las olas con el tiempo. Algunos de los resultados obtenidos para el año 2010 de flujo energético se presentan en la Figura 1.11. Esta investigación es entonces, una continuación a la propuesta hecha por los estudiantes de ingeniería y es parte del proyecto de monitoreo oceanográfico que realiza la empresa LaGeo para la prospección del recurso energético de las olas en la playa Mizata. A su vez, busca optimizar los métodos de medición de flujo energético y poder establecer la distribución de la energía en una porción de la costa.

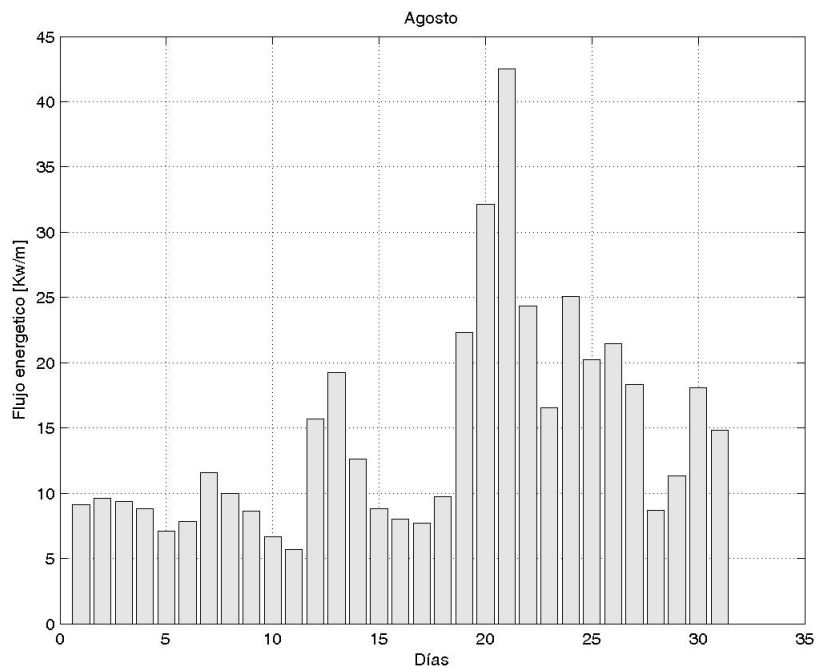


Figura 1.11: Gráfica del flujo energético en Kw/m vs. Días del mes de Agosto del año 2010, en la playa de Mizata. Tomada de [18].

# Capítulo 2

## Metodología

La investigación requiere del uso de la sonda Tritón ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) fabricada por la Compañía Sontek, este tipo de instrumento es esencial para obtener el campo direccional o el espectro direccional del oleaje. A lo largo de este capítulo se describe: 1. El diseño experimental de la investigación. 2. El funcionamiento y las partes del sensor Tritón ADV. 3. El método que utiliza el dispositivo para medir los parámetros de oleaje: Efecto Doppler y Método PUV. 4. Descripción del algoritmo utilizado para procesar los datos.

### 2.1. Diseño Experimental

El montaje experimental para la recolección de datos se muestra en la Figura 2.1 la cual describe de manera general como se captan los datos de dirección y presión del oleaje.

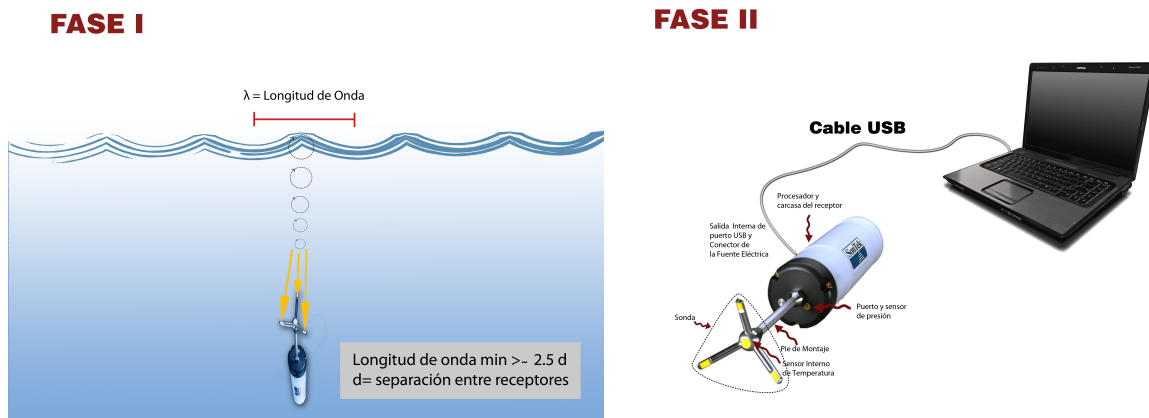


Figura 2.1: Fase I: Montaje del Tritón ADV, el cual mide variaciones de presión y velocidad causadas por la ola. Fase II: Partes del instrumento y descarga de datos. Imagen creada por M. Alvarado

La sonda toma datos de variaciones de presión y variaciones de las dos componentes (Horizontal y Axial) de la velocidad orbital de la ola. En el montaje experimental la sonda debe encontrarse a una profundidad determinada, está emite una señal acústica y muestrea una señal retorno midiendo los parámetros anteriormente mencionados.

Las series temporales captadas se registran en la memoria del instrumento y luego son descargados a la computadora por medio de un puerto USB y analizados posteriormente por el software del instrumento, con el fin de obtener los parámetros necesarios para el calculo del espectro direccional y el resto de características de las olas muestreadas. Dependiendo del intervalo de muestreo así es la cantidad de datos que se pueden almacenar en la memoria el dispositivo. En la investigación se sigue un intervalo de muestreo de tipo: Reducción de ciclo de muestreo, detallado en el manual del Tritón ADV, el cual reduce el gasto de batería permitiendo la toma de datos a lo largo de 31 días [16].

La separación de los haces en el instrumento limita el mínimo de longitud de onda que el aparato puede medir. El límite de Nyquist de las longitudes de onda establece que el arreglo; solo puede resolver para olas no más cortas, que el doble del espaciamiento entre dos puntos adyacentes medidos. La mayoría de perfiladores tienen de 20 a 30 grados de separación y que sumergidos a 50 m permiten una resolución de 146 – 230m. El Tritón no es capaz de muestrear olas de 25 Hz o más debido a su configuración geométrica y es más eficiente en resolver parámetros de oleaje para olas clasificadas como gravitacionales, cuya frecuencia está entre  $10^{-5}$  Hz a 5 Hz [1].

El Tritón tiene incorporado un sensor de presión manométrica, el cual ha sido calibrado para medir la presión relativa a una presión atmosférica dada de un lugar en específico. El Tritón puede funcionar como un medidor de oleaje direccional, utilizando el confiable método de medición PUV para obtener el espectro direccional.

## 2.2. Dispositivo ADV Tritón: Principios de operación.

La sonda consiste en un transmisor y tres receptores para mediciones en 3D como se detalla en la Figura 2.2. Los componentes de la sonda según el manual del Tritón [16] son:

- **El transmisor:** el transmisor acústico central genera un pequeño pulso de sonido con la mayoría de energía concentrada en un haz delgado de aproximadamente 6mm de diámetro. La frecuencia de la señal emitida es de 10MHz.
- **Receptores:** los receptores acústicos están montados en el brazo que sale desde la cabeza del centro de la sonda, son sensibles a un haz delgado y enfocado en un volumen común localizado a una distancia fija de la cabeza de la sonda (nominalmente a 10 cm), el cual es conocido como: **volumen de muestreo**.



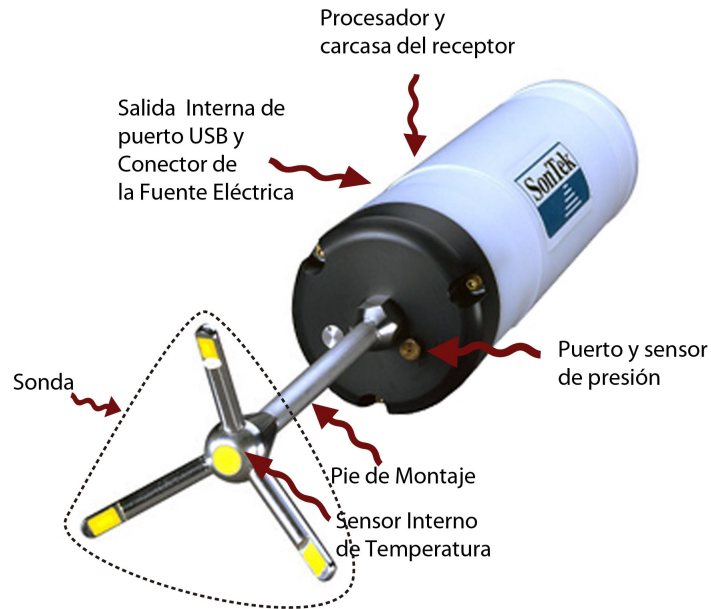


Figura 2.2: Partes del perfilador acústico doppler, Tritón ADV. Imagen creada por M. Alvarado

- **Pie del montaje:** la sonda esta montada sobre un pie de metal rígido de aproximadamente 15 cm.
- **Procesador:** el procesador de Tritón se compone de dos placas de circuito impreso que llevan a cabo todos los cálculos para estimar la velocidad Doppler y recolectar los parámetros respectivos. Los tableros se montan dentro de una carcasa sumergible.
- **Fuente de energía y cable de comunicación:** un solo cable lleva corriente directa y comunicación entre la computadora y el procesador de datos o memoria del sensor.
- **Sensor de temperatura:** la velocidad del sonido en el agua es principalmente una función de la temperatura y la salinidad del medio, por lo tanto el Tritón incluye un sensor de temperatura ( $\pm 0.1$  °C;  $\pm 0.2$  °F) para efectuar correcciones automáticas a las señales retorno captadas por los receptores.
- **Brújula interna del sensor:** mide dirección magnética y dos ejes de inclinación (máxima inclinación  $\pm 50$  grados). Ayuda al Tritón a reportar velocidades medidas en un sistema coordenado (ENU: East, North y UP).
- **Sensor de presión:** este sensor está ubicado justo debajo de la sonda al final de la carcasa del instrumento. El sensor provee una medida integrada de la profundidad en donde se ha montado el Tritón y mide las series de cambios de presión debido a las distintas alturas que presentan las olas cuando pasan por encima de este.

- **Batería:** Utiliza una batería especial por despliegue y también cuenta con un cable impermeable para un despliegue corto desde un bote o lancha, en caso de que se quieran tomar datos en tiempo real.

### 2.2.1. Funcionamiento del sensor Tritón ADV

El Tritón mide la velocidad del agua usando el principio físico del Efecto Doppler, el cual consiste en el aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto a su observador [9].

Esto queda representado en la siguiente ecuación:

$$F_{doppler} = -F_{fuente} \left( \frac{V}{C} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $F_{doppler}$  es el cambio en la frecuencia recibida o Doppler shift,  $F_{fuente}$  es la frecuencia transmitida,  $V$  la velocidad del sonido relativa al receptor y  $C$  es la velocidad del sonido en el agua. La velocidad  $V$  representa la velocidad relativa entre la fuente y el receptor o es más bien el movimiento que cambia la distancia entre ellos dos. Si la distancia entre dos objetos decrece, la frecuencia se incrementa. Si la distancia se incrementa, la frecuencia disminuye.

El proceso de medición de la velocidad esta representado en la Figura 2.3 y consiste en los siguientes pasos, según el manual de principios de operación de SONTEK [16]:

- El transmisor genera un pulso corto de sonido a una frecuencia conocida (10MHz).
- El sonido viaja a través del agua a lo largo del eje transmisor del haz.
- Mientras el pulso pasa a través del volumen de muestreo (locación física donde el tritón hace su medida en 3D de la velocidad) el sonido es reflejado en todas direcciones por materia en particular (sedimento, pequeños organismos, burbujas).
- Una parte de la energía reflejada viaja de regreso a lo largo del eje receptor del haz.
- La señal reflejada es captada por los receptores acústicos.
- El procesador del Tritón mide los cambios en la frecuencia de cada receptor.
- El corrimiento Doppler es proporcional a la velocidad de las partículas a lo largo del eje biestático del receptor y el transmisor. El eje biestático está ubicado a mitad de camino entre el eje del transmisor y el eje del receptor.
- Conocer la orientación relativa de los ejes biestáticos de todos los receptores le permite al Tritón calcular la velocidad del agua en 3D dentro del volumen de muestreo.
- Después de obtener las señales de velocidad y presión, estas son guardadas en un data-logger contenido en el interior del instrumento, luego son descargados con el cable USB a la computadora y procesados con el Software SONWAVE PRO.

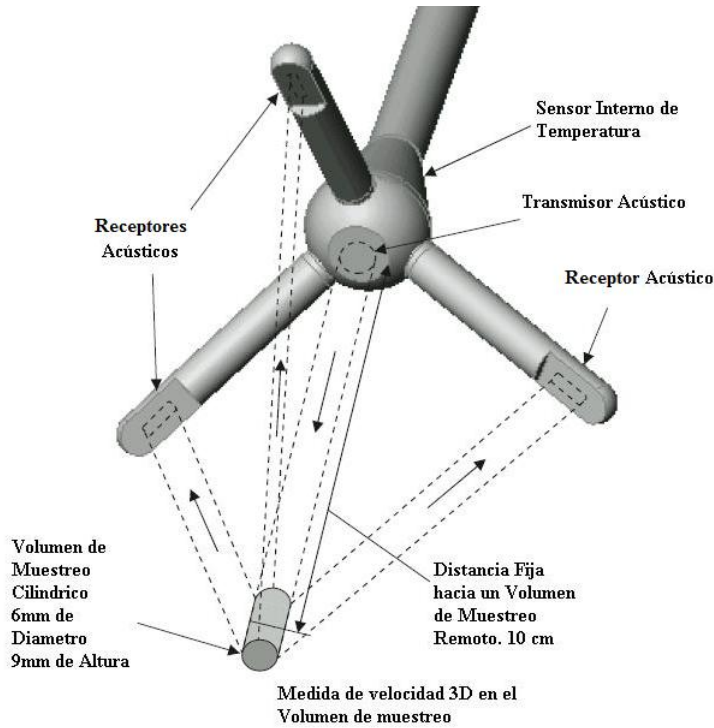


Figura 2.3: Descripción de la Sonda del instrumento Tritón ADV. Tomada y modificada de [16].

### 2.3. Método PUV

Para obtener los parámetros de oleaje se utiliza el método conocido como PUV. Su nombre se deriva de los tres parámetros que se miden para calcular el espectro direccional; la presión y las dos componentes horizontal (U) y axial (V) de la velocidad orbital de la ola [17]. Específicamente, las olas son medidas usando la presión dinámica asociada a dicha ola (P) y la velocidad orbital que esta induce por debajo de la superficie, la cual consta de dos componentes: U y V para las direcciones x y y. La señal de presión es utilizada para estimar el espectro de frecuencias y la densidad espectral de energía obtenida es usada para calcular la altura y periodo de la ola. Las medidas de la velocidad orbital y axial proveen un estimado para la dirección del oleaje. Debido a que el cálculo de dichos parámetros se basa en la distribución de la energía de la ola y no se miden directamente de la superficie, son considerados **parámetros inferidos** [17].

Ambas cosas **la presión dinámica y las velocidades orbitales** son ocasionadas por las olas en la superficie. Las señales asociadas con estas propiedades son complicadas de medir por el hecho que se atenúan exponencialmente con la profundidad. El comportamiento exacto de la atenuación tiene que ver con la longitud de onda y la profundidad, en pocas palabras el comportamiento es el siguiente:

- Si nos movemos hacia abajo en la columna de agua la señal es cada vez más atenuada.

- Si la longitud de onda decrece (con un periodo corto o alta frecuencia) la señal también experimenta un incremento en su atenuación.

En conclusión las olas se vuelven más difíciles de medir a medida avanzamos a mayores profundidades o se vuelven más cortas en periodo [17].

Las olas en la superficie del océano están claras para nosotros, pero es menos obvio el movimiento generado por éstas debajo de la superficie, tal como se describe en la sección 1.2 de este documento. Debajo del nivel del mar las olas generan movimientos orbitales mientras pasan por un punto dado [8], como se muestra en la Figura 1.5, movimiento que se reduce conforme se aumenta la profundidad. Debido a esta atenuación de la señal ambas cosas, la profundidad y la frecuencia están limitadas cuando se trata de medir con un sensor ADV.

La siguiente tabla provee una guía en general de las limitaciones que poseen los sensores PUV para medir las olas debido a la profundidad, frecuencia y altura [17]. La profundidad a la que se muestrea en esta investigación oscila entre los 10 y 15 metros, por lo tanto se ha resaltado ese rango de datos en el cuadro 2.1. Las alturas de ola presentadas son las alturas mínimas que pueden medirse para diferentes profundidades y periodos pico.

Este tipo de instrumento (el Tritón) es el más adecuado para medir olas que se encuentra dentro de la banda de frecuencias de 0.01 a 3.0 Hz [16], justo la parte del espectro de las olas generadas por el viento local, como lo muestra la Figura 1.2.

Cuadro 2.1: Alturas significativas mínimas medibles para diferentes Profundidades y periodos pico. Tomada de [17].

Profundidad (m)	Periodo pico (s)	Altura significativa Hs (m)
20	5.8	0.75
20	6.4	0.60
20	7.2	0.35
20	8.3	0.30
20	10.1	0.20
<b>15</b>	<b>5.0</b>	<b>0.50</b>
<b>15</b>	<b>5.5</b>	<b>0.40</b>
<b>15</b>	<b>6.2</b>	<b>0.25</b>
<b>15</b>	<b>7.1</b>	<b>0.20</b>
<b>15</b>	<b>8.7</b>	<b>0.15</b>
<b>10</b>	<b>4.1</b>	<b>0.40</b>
<b>10</b>	<b>4.5</b>	<b>0.30</b>
<b>10</b>	<b>5.0</b>	<b>0.20</b>
<b>10</b>	<b>5.8</b>	<b>0.15</b>
<b>10</b>	<b>7.1</b>	<b>0.10</b>
5	2.9	0.20
5	3.2	0.15
5	3.6	0.10
5	4.1	0.07
5	5.0	0.05
3	2.3	0.12
3	2.5	0.10
3	2.8	0.05
3	3.2	0.04
3	3.9	0.03

**El Método PUV funciona comparando series de tiempo de velocidad y presión.**

La Figura. 2.4 muestra que la presión y la velocidad están en fase una con la otra y correlacionadas. La velocidad por debajo de la cresta tiene la misma dirección que la ola. En la figura observamos que la ola se mueve en dirección de la flecha azul. La presión máxima se encuentra por debajo de la cresta y la máxima velocidad en dirección de la ola también se encuentra debajo de la cresta representada por una flecha roja [2].

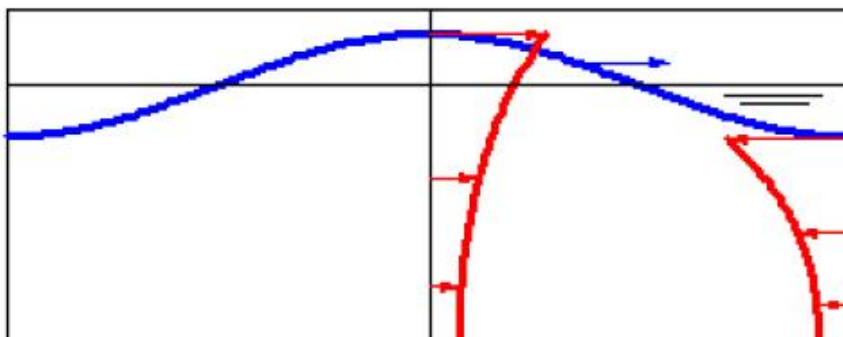


Figura 2.4: Método PUV: La ola de la izquierda se mueve en la dirección de la flecha azul. El máximo en la presión se encuentra debajo de la cresta y la velocidad máxima, en la dirección de la onda, se da también por debajo de la cresta. Tomada de [2].

En la Figura 2.5 observamos series de tiempo de presión y velocidad. La componente Este de la velocidad y la presión son casi iguales, es decir, van en fase una con otra. Ya que los máximos y mínimos en la velocidad coinciden con los máximos y mínimos de la presión, puede decirse que las olas viajan hacia el este, debido a que es en ésta componente que la correlación entre las dos señales es alta. La componente Norte por el contrario, es más pequeña y no coincide con la señal de presión, este es otro indicador de que las olas van exactamente hacia el este [2].

Entonces, el método PUV compara la presión y la velocidad para determinar la dirección de la ola. El Tritón hace lo mismo con 3 componentes de dirección (N, E y Up) [16], sin embargo, en vez de realizar el análisis con las series temporales originales como lo hemos intentado explicar hasta ahora, se usan las transformadas de Fourier para separar las señales en diferentes bandas de frecuencias y determinar la dirección de cada banda por separado. Esto significa que si se tiene un conjunto de olas provenientes de una tormenta que viajan a cierta dirección y olas que han sido generadas por vientos locales provenientes de otra dirección, se puede separar ambas frecuencias y decir de qué dirección proviene cada set de olas por separado. El análisis PUV hace una importante suposición: que las olas de una frecuencia determinada provienen de una dirección principal [2].

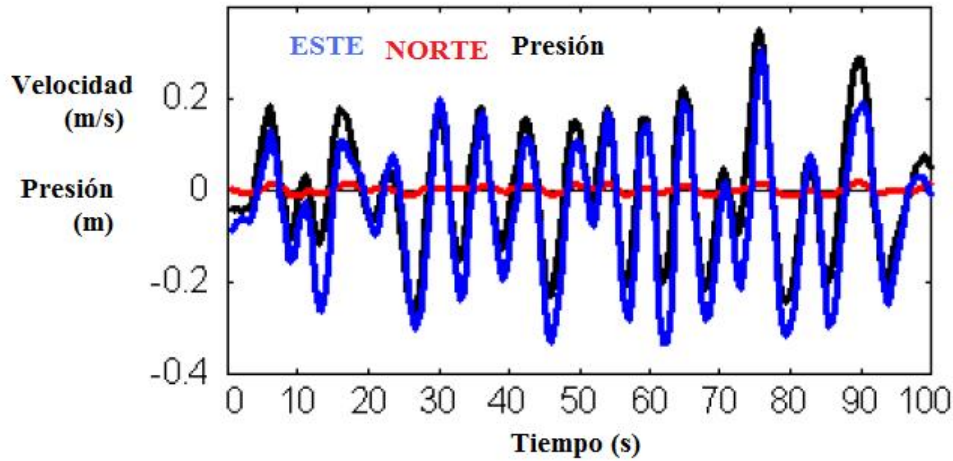


Figura 2.5: Velocidades y presión de olas que se mueven hacia el Este, el valor medio ha sido removido de la señal de presión. Tomada de [2].

## 2.4. Análisis de Datos

Las medidas realizadas dentro de esta investigación han sido analizadas elaborando un código en Matlab 7.0 que integra la Directional Wave Spectra Toolbox (DIWASP). La DIWASP consiste en una serie de herramientas creadas para analizar parámetros de oleaje. El proceso de análisis de las señales de velocidad y presión se describen esquemáticamente en la Figura. 2.6, y se detalla en el manual de la compañía NORTEK sobre el funcionamiento del método PUV [17] y en el capítulo 4 del libro Ocean Wave Energy [5].

### 2.4.1. Transformada Rápida de Fourier o FFT

La transformada de Fourier discreta es una herramienta poderosa para aproximar coeficientes de Fourier, sumas parciales de la serie de Fourier y transformadas de Fourier. Sin embargo, tal herramienta es útil si hay técnicas de cálculo eficientes para llevar a cabo el gran número de cálculos involucrados en las aplicaciones típicas [19]. La transformada rápida de Fourier es entonces, un procedimiento mucho más eficiente para calcular las transformadas discretas de Fourier, cuyos cálculos permiten pasar una serie de datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y observar su distribución espectral.

El algoritmo de la FFT ha sido implementado en muchísimos paquetes computacionales, en esta investigación se utilizó la toolbox de Signal Processing de Matlab 7.0 para la realización del análisis de Fourier.

La reducción de tiempo de cálculo es muy grande, por ejemplo; en una señal como la nuestra que usualmente contiene 767 o más número de muestras, el cálculo consistiría de 588289 multiplicaciones, en cambio si aplicamos la FFT haremos solo 7350 operaciones. El fundamento del algoritmo consiste en el hecho de que una Transformada discreta

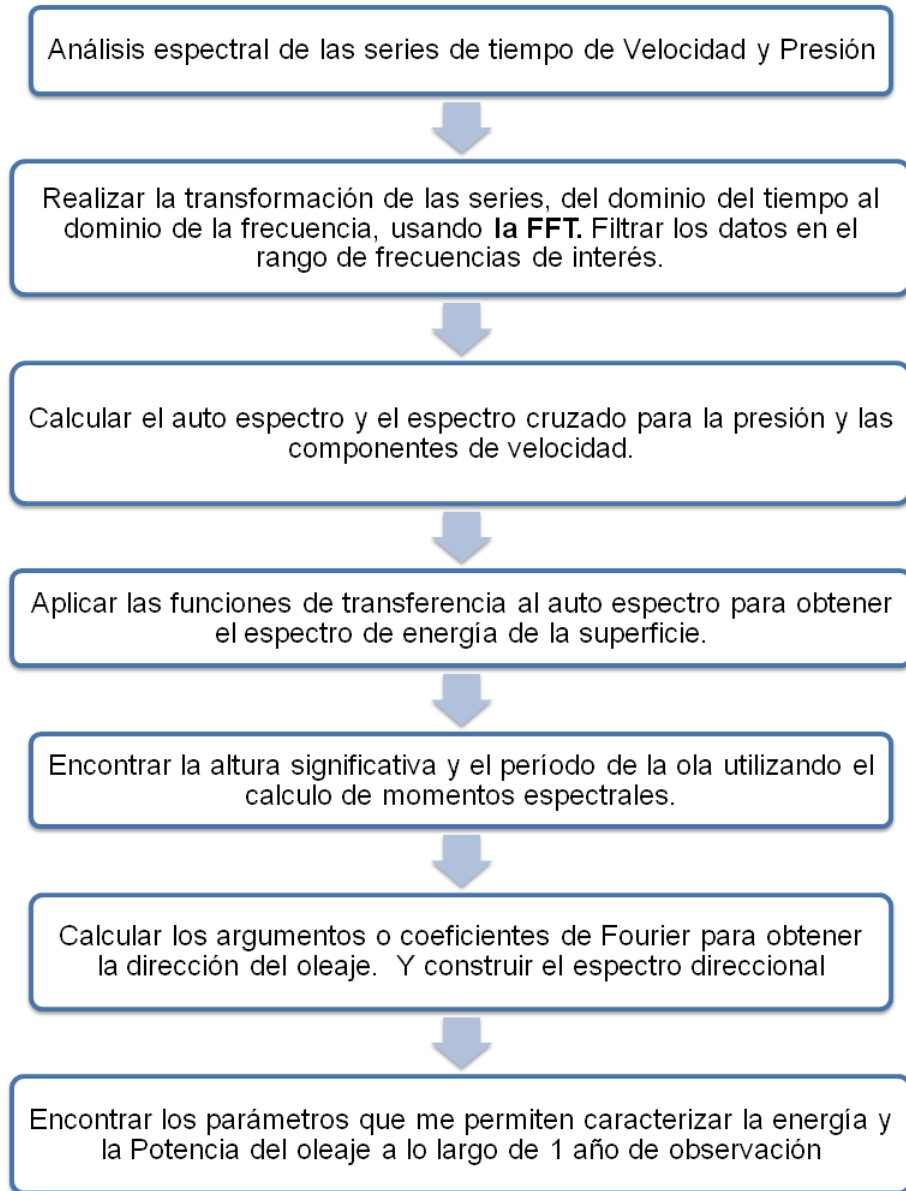


Figura 2.6: Proceso de análisis que seguirá el código en Matlab para obtener el espectro direccional, la altura y el periodo de la ola.

de Fourier (TDF) de longitud  $N$ , se puede escribir como la suma de dos transformadas de Fourier de longitud  $N/2$ , una puede ser de las muestras pares y otra de muestras impares. Este algoritmo puede usarse recursivamente, con el cual reducimos el problema de calcular una transformada de longitud  $N$ , a calcular dos transformadas de longitud  $N/2$ , y cada una de ellas a su vez la calculamos como dos transformadas de longitud  $N/4$ , y así sucesivamente. Hasta llegar a una transformada de longitud 1, que simplemente es el mismo número. El problema principal consiste en reorganizar los datos en números pares



e impares en cada iteración [20].

## 2.4.2. Auto correlación y correlación cruzada

Cuando tenemos dos grupos de series de tiempo y queremos conocer las relaciones entre estas, se calcula la función de coherencia o correlación cruzada, también conocida por su nombre en inglés como "cross correlation".

En estadística, el término **correlación cruzada** a veces es usado para referirse a la covarianza  $cov(X, Y)$  entre dos vectores aleatorios  $X$  e  $Y$ . En procesamiento de señales, la correlación cruzada (o a veces denominada "covarianza cruzada") es una medida de la similitud entre dos señales, frecuentemente usada para encontrar características relevantes en una señal desconocida por medio de la comparación con otra que sí se conoce [20].

Para nuestra investigación el espectro cruzado completo de las señales es presentado como:

$$C_{xy} = S_x S_y^* \quad (2.2)$$

Donde el  $*$  indica el conjugado de la densidad espectral de la serie. El espectro cruzado es utilizado para calcular la dirección de las olas [17].

La **Auto correlación** por lo tanto, es la relación entre los valores de una misma variable tomados en tiempos distintos. La relación entre un valor de la serie tomado a un tiempo  $\tau$  y los valores de esa misma serie tomados en un tiempo diferente  $\text{lag}(\tau)$ . En tal caso la fórmula es la misma que la ecuación 2.2 y varía en que la correlación se realiza entre la misma variable  $C_{xx}$  [21]. El auto espectro es usado para estimar los parámetros de altura significativa y periodo de la ola [17].

## 2.4.3. Función de Transferencia

A medida que las olas se propagan inducen un movimiento orbital en las partículas de agua, tal como lo representa la Figura 1.5. Como se mencionó anteriormente el método PUV se enfoca en medidas de presión y en medir dicha velocidad orbital. La medida es tomada a 10 cm del instrumento, por lo tanto, para poder llegar a una medida representativa de la velocidad en la superficie es necesario aplicar funciones de transferencia que obtengan el espectro completo de la energía en la superficie [17].

Las funciones de transferencia que relacionan las cantidades medidas por debajo del nivel del mar con los parámetros en la superficie son:

$$T_p = \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \rightarrow \text{Presión.} \quad (2.3)$$

$$T_v = \frac{\omega \sinh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \rightarrow \text{Velocidad.} \quad (2.4)$$

Donde  $h$  es la profundidad del agua,  $z$  es la posición en la columna de agua,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $k$  es el número de onda [17].

Para encontrar el espectro completo de energía en la superficie, aplicamos las funciones de transferencia a los espectros cruzados y al auto espectro calculado de las series de tiempo medidas:

$$C_{\eta\eta} = \frac{C_{pp}}{T_p^2} = \frac{C_{vv}}{T_v^2} \quad (2.5)$$

#### 2.4.4. Altura y periodo de la ola

Las alturas de las olas generalmente se clasifican por el parámetro estándar de Altura significativa,  $H_s$  (descrito en la sección 1.2.5). Clásicamente esta estimación se realiza mediante la clasificación de todas las ondas en un tiempo récord según la altura. Una vez que esto se ha hecho el parámetro puede ser calculado. Sin embargo, en nuestro enfoque, se utiliza el espectro de la superficie del mar para una aproximación de este valor. La matemática aplicada es el **cálculo de momentos** [17].

Se le llama momentos a los parámetros utilizados para calcular las funciones de densidad probabilística; por analogía con los sistemas mecánicos donde los momentos describen la distribución de fuerzas relativas a un punto de referencia [22]. Por lo tanto para calcular la altura significativa esperada en cierto momento se necesita una función generadora de momentos:

$$m_k = \int f^k C(f) df \quad (2.6)$$

Donde  $C$  es el espectro de energía y  $f$  es la frecuencia. Entonces obtenemos la altura significativa por medio de:

$$H_{m0} = 3,8\sqrt{m_0} \quad (2.7)$$

Y el periodo se define como:

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2.8)$$

### 2.4.5. Dirección y estimación del espectro direccional

Comúnmente se describe la distribución de la energía de las olas sobre la frecuencia y dirección con las siguientes relaciones tomadas de [17] :

$$E(f, \theta) = S(f)D(f, \theta). \quad (2.9)$$

Donde S es la distribución para el dominio de la frecuencia y D la distribución direccional normalizada. D puede ser aproximada por una expansión de Fourier de acuerdo a:

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2} + \sum_n (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \right]. \quad (2.10)$$

Generalmente los dos parámetros que definen la distribución direccional son la dirección media  $\theta_1$  y la propagación de distribución  $\sigma$ . Los cuales se definen por:

$$\theta_1(f) = \arctan\left(\frac{b_1(f)}{a_1(f)}\right) \quad (2.11)$$

$$\sigma = \sqrt{2(1 - r_1)} \quad (2.12)$$

Donde

$$r_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (2.13)$$

Los coeficientes de Fourier se calculan a partir de:

$$a_1(f) = \frac{C_{pu}}{[C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.14)$$

$$b_1(f) = \frac{C_{pv}}{[C_{pp}(C_{uu} + C_{vv})]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.15)$$

$$a_2(f) = \frac{C_{uu} - C_{vv}}{C_{uu} + C_{vv}} \quad (2.16)$$

$$b_2(f) = \frac{2C_{vu}}{C_{uu} + C_{vv}} \quad (2.17)$$

### 2.4.6. Cálculo de la Potencia del oleaje

Para el cálculo del potencial medio de energía de un estado de mar concreto, se parte de la energía total contenida en éste, la cual se define mediante la función de densidad espectral direccional o espectro direccional ya definido en este apartado. Por lo tanto la potencia queda definida como el producto de la velocidad a la cual se transmite la energía del oleaje a través de la superficie del océano en un intervalo de tiempo [24].

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int \frac{S(f)}{f} df = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_{m0}^2 \quad [W/m] \quad (2.18)$$

# Capítulo 3

## Discusión y análisis de resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados finales de los espectros direccionales, alturas significativas, periodos energéticos y potencial de energía de las olas para los años 2010 y 2011. El capítulo se divide en las siguientes secciones: 1. Descripción general de los datos a analizar, 2. Lectura de datos, 3. Funciones de densidad espectral, 4. Espectros direccionales para los años 2010 y 2011, 5. Alturas Significativas, 6. Periodos energéticos y 7. Potencial energético de las olas para un año completo de observación.

### 3.1. Descripción de los datos a analizar

Los datos han sido analizados utilizando un código creado en Matlab 7.0 que integra la DIWASP toolbox definida en la sección 2.4 de este documento. Para la creación de dicho código se utilizó un conjunto de datos prueba, el cual comprende del 10 de Febrero al 11 de Marzo del 2011. Este mismo conjunto de datos se ocupará para explicar el proceso de análisis por el cual pasan todas las series de datos recolectadas durante el 2010 y el 2011. Cada conjunto de datos tiene diferente número de ráfagas de muestreo o burst<sup>1</sup>. El intervalo de muestreo entre cada ráfaga es de 1 hora para ambos años estudiados.

En el cuadro 3.1 se especifican las fechas y parámetros muestreados en cada conjunto de datos, la hora de inicio y la hora de finalización de la toma de las medidas, para ambos años de estudio.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Los burst son intervalos de muestreo rápidos o rafagas de muestreo que presentan la ventaja de ahorrar la batería del instrumento y poder medir más días. [16]

<sup>2</sup>Al finalizar del documento podrá encontrar un CD, en el cual se adjuntan todas las bases de datos utilizadas en esta investigación: Datos del Tritón ADV, Anemómetros de Mizata – Acajutla y el código para analizar los datos

Cuadro 3.1: Descripción de cada archivo de datos obtenido por del Tritón ADV.

Nombre del archivo	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Número de Muestras (Burst)
JAN002.dat	20/01/2010 12 hrs.	22/02/2010 10 hrs	790
FEB002.dat	22/02/2010 14 hrs.	22/03/2010 10 hrs	669
MAR002.dat	26/03/2010 12 hrs.	26/04/2010 10 hrs	747
APR002.dat	26/04/2010 16 hrs.	05/05/2010 08 hrs	210
JUL002.dat	27/07/2010 15 hrs.	05/09/2010 08 hrs	954
SEP002.dat	13/09/2010 16 hrs.	08/10/2010 12 hrs	597
OCT002.dat	08/10/2010 17 hrs.	05/11/2010 10 hrs	666
NOV002.dat	05/11/2010 14 hrs.	07/12/2010 13 hrs	768
DEC002.dat	07/12/2010 17 hrs.	11/01/2011 10 hrs	834
JAN001.dat	11/01/2011 15 hrs.	10/02/2011 09 hrs	715
FEB001.dat	10/02/2011 12 hrs.	14/03/2011 09 hrs	767
MAR001.dat	14/03/2011 13 hrs.	12/04/2011 10 hrs	694
DEC001.dat	02/12/2011 15 hrs.	06/01/2012 12 hrs	814

## 3.2. Lectura de Datos

La primera lectura de datos se realizó cargando el archivo FEB001.tri al software SON-WAVE PRO. El software genera un archivo formato ASCII (FEB001.dat), cargable en Matlab 7.0 para realizar un análisis mas detallado de las señales.

La amplitud de las señales de presión y velocidad filtradas se muestran en la Figura 3.1. A simple vista no se puede decifrar qué componente de la velocidad coincide más con la presión, por lo tanto es difícil predecir la dirección del oleaje. Para ello es necesario el análisis de la correlación de cada una de las señales, lo cual es mas sencillo si se realiza en el dominio de la frecuencia.

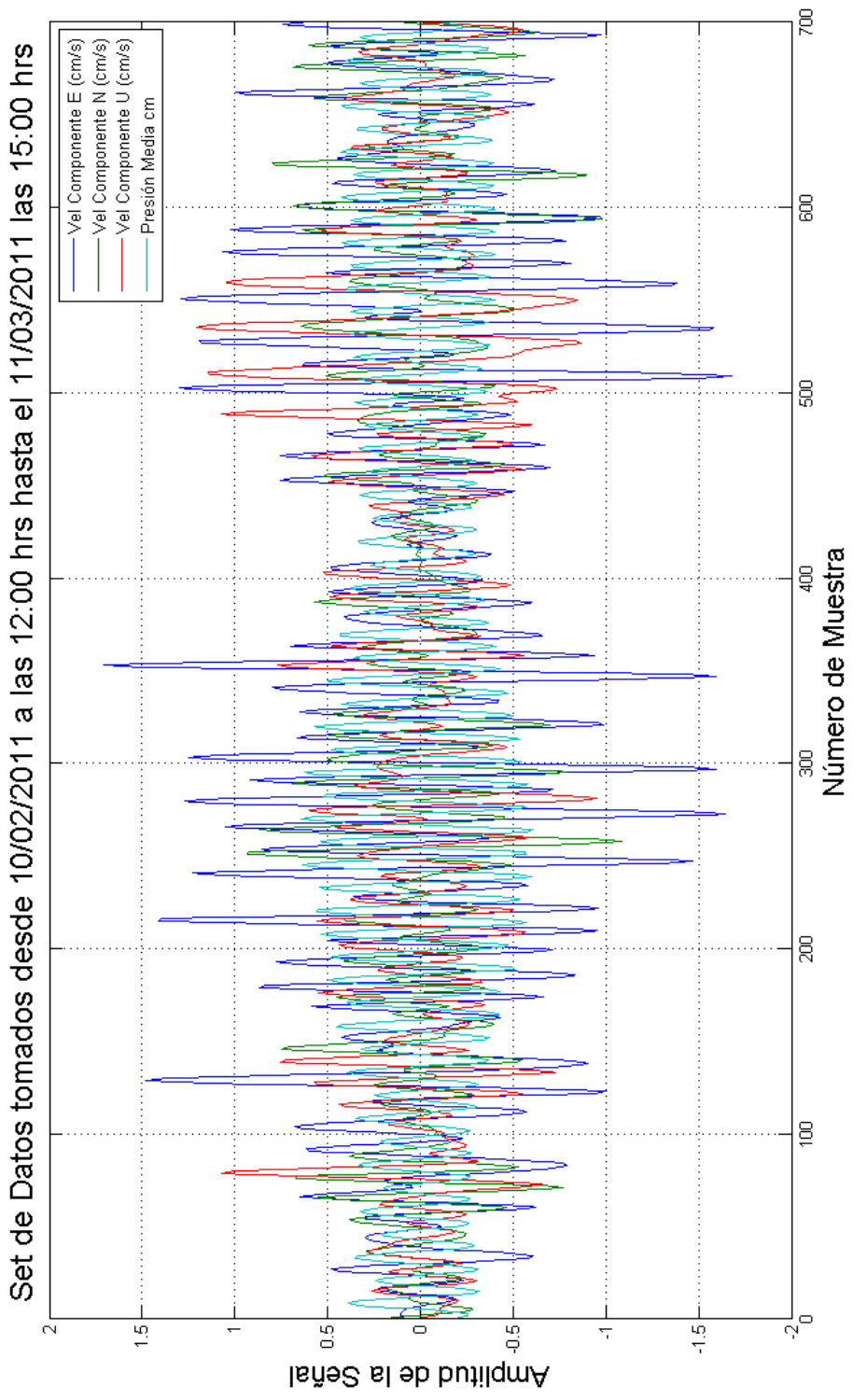


Figura 3.1: Amplitud de las señal de presión y de las componentes de velocidad medidas por el Tritón ADV

### 3.3. Densidad espectral vs. Frecuencia (FFT)

En la siguiente gráfica observamos el espectro de frecuencias de la serie de presión y las componentes de velocidad orbital de la ola, en donde podemos distinguir dos grupos principales de olas.

El primer grupo se encuentra en el rango de frecuencias de 0.04 Hz a 0.05 Hz, las cuales corresponden al oleaje tipo swell; como lluvias tropicales fuera de la costa, seiches o marejadas. Estos tipos de olas, según lo expresado en la sección 1.1.2, registran bajas frecuencias como se observa en la gráfica.

El segundo grupo se encuentra a un rango de frecuencias de 0.06 Hz a 0.1 Hz, que se identifica como olas generadas por la fuerza del viento local. Estas ultimas son el objeto de estudio en la investigación por su alto contenido energético, la mayor energía espectral es encontrada a la frecuencia de 0.08 Hz.

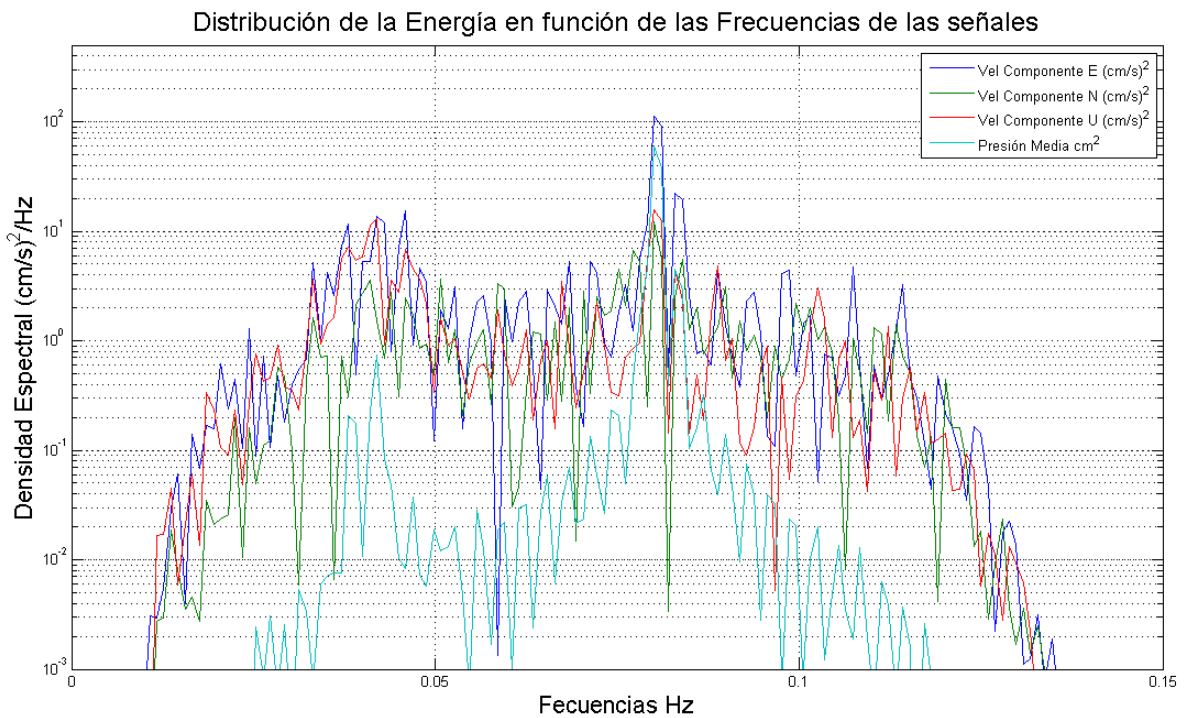


Figura 3.2: Distribución espectral del oleaje de la playa Mizata, para los días del 10 de Febrero al 11 de Marzo 2011.



### 3.4. Espectros direccionales para los años 2010 y 2011

Para el cálculo del espectro direccional se desarrolló un código en Matlab 7.0 que integra la Directional Wave Spectra Toolbox como se explica en la sección 2.4 de esta investigación. Los espectros direccionales han sido obtenidos utilizando el Método de la Transformada Directa de Fourier (Direct Fourier Transfer Method DFTM)[5]. La resolución espacial de la dirección del oleaje en este método, se ve afectada si se tiene menos de 72 datos de entrada, por lo tanto todos los parámetros calculados a partir del espectro direccional son un promedio de 72 horas.

Los gráficos polares nos describen la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia y dirección de onda. La energía espectral se representa en la intensidad de los colores: el color rojo representa la componente más energética, las frecuencia están ubicadas en la escala radial y la dirección de hacia donde se dirige la componente más energética se especifica de la siguiente manera: el Norte a los 0°, el Este a los 90°, el sur a los 180° y el Oeste a los 270°.

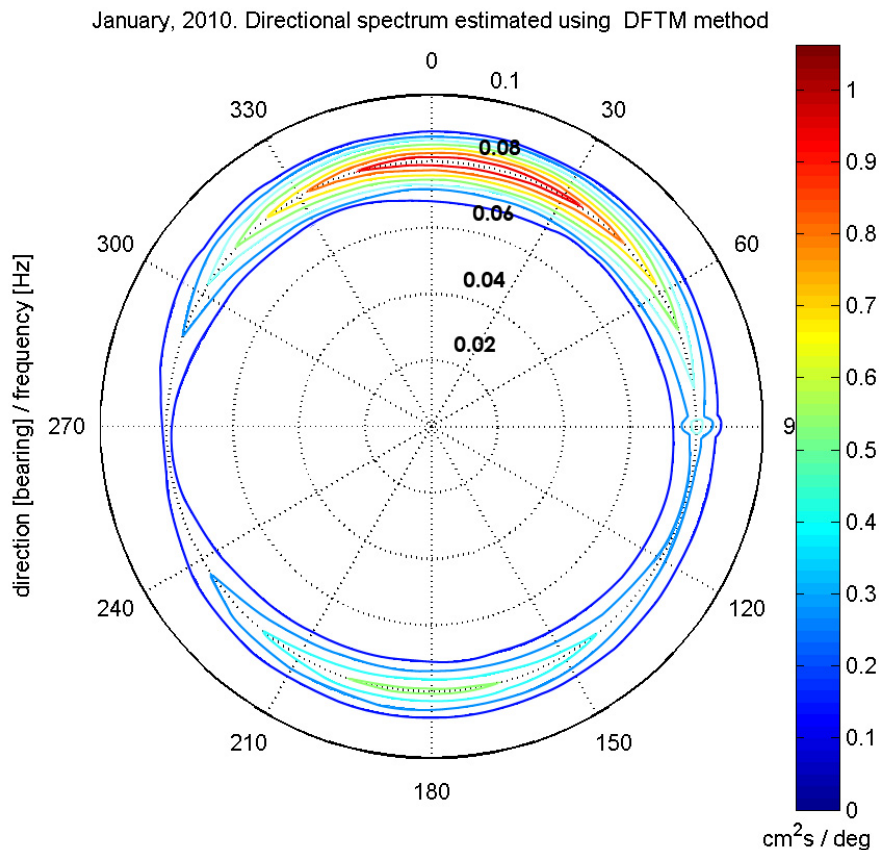


Figura 3.3: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JAN002.tri

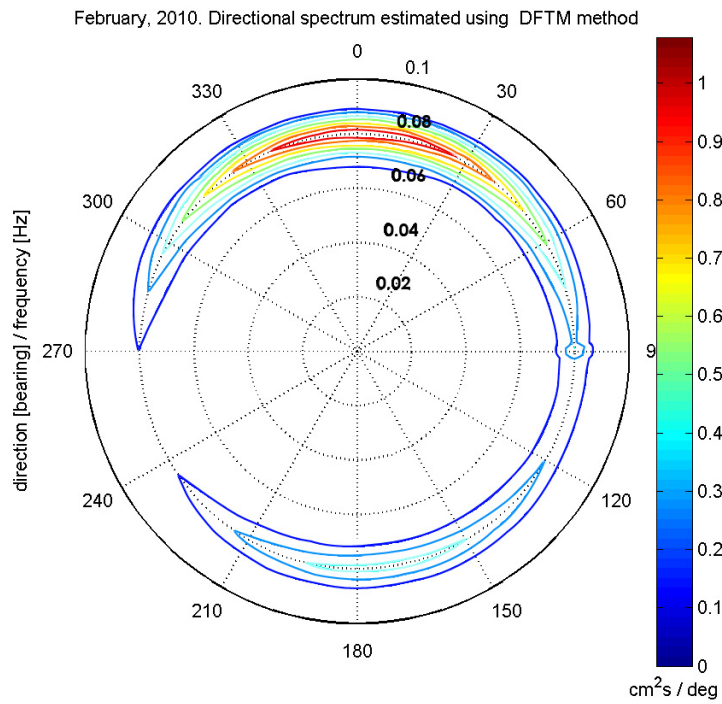


Figura 3.4: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos FEB002.tri

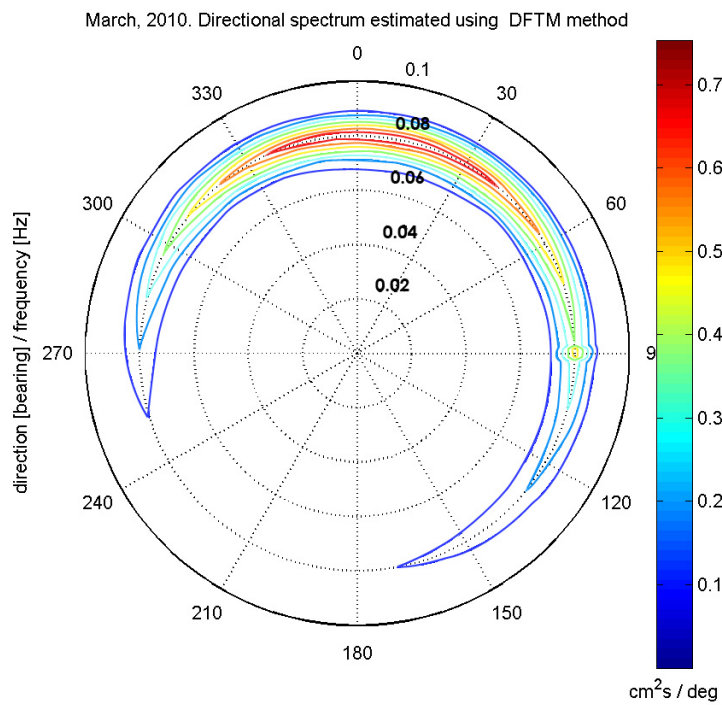


Figura 3.5: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos MAR002.tri

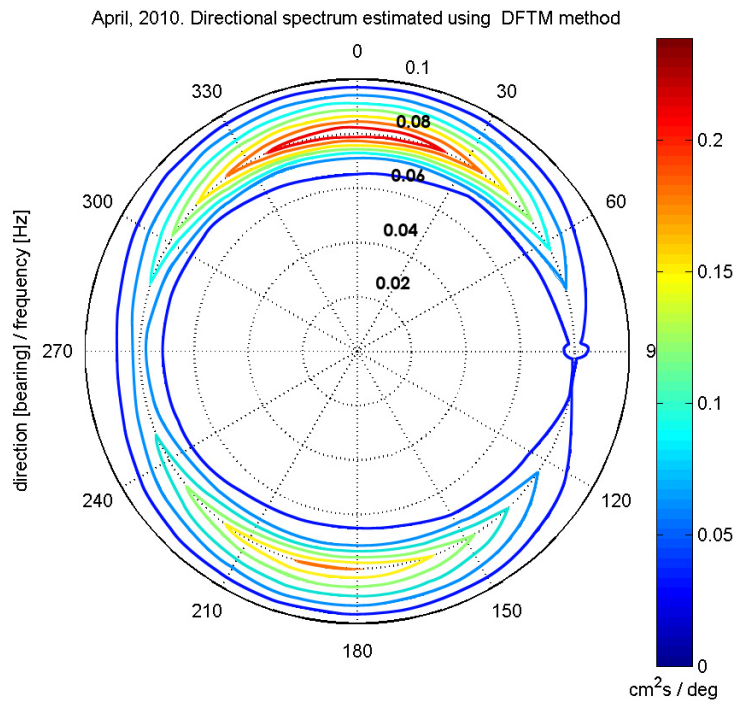


Figura 3.6: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos APR002.tri

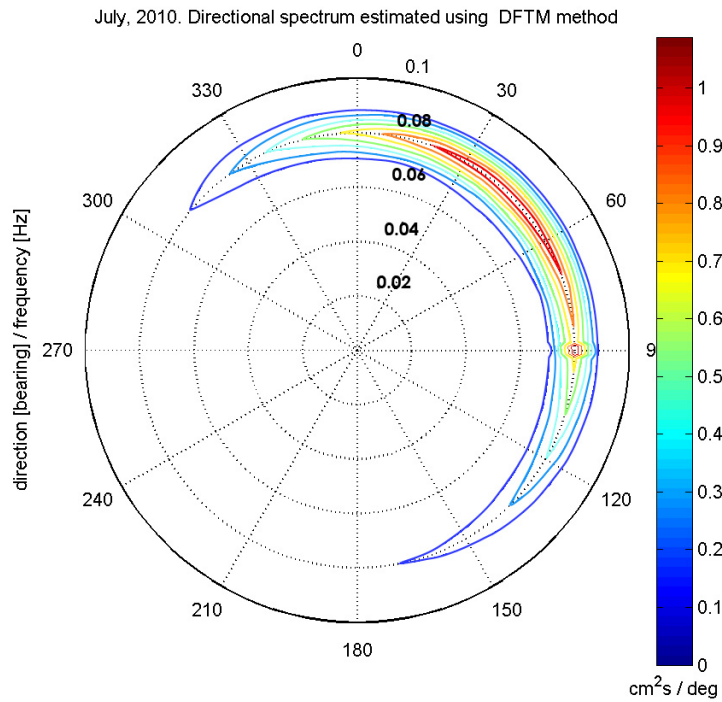


Figura 3.7: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JUL002.tri

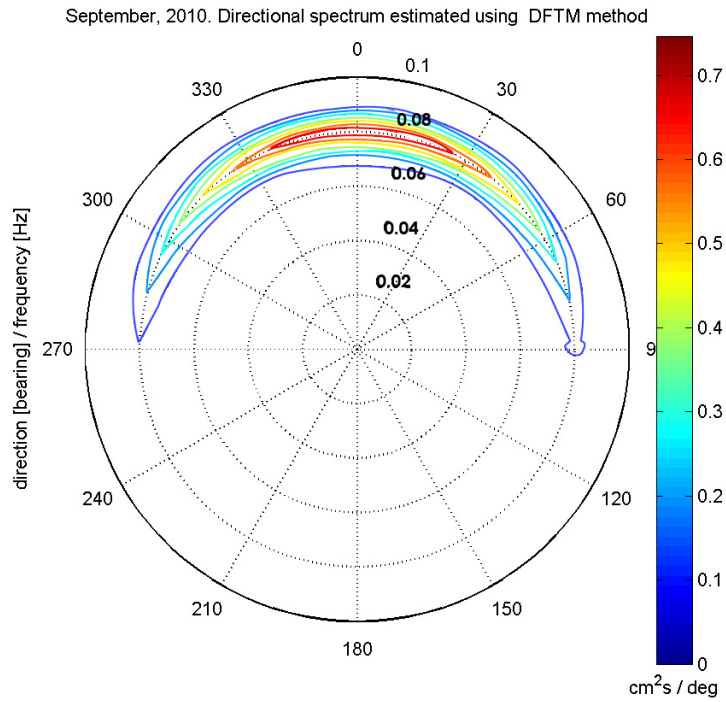


Figura 3.8: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos SEP002.tri

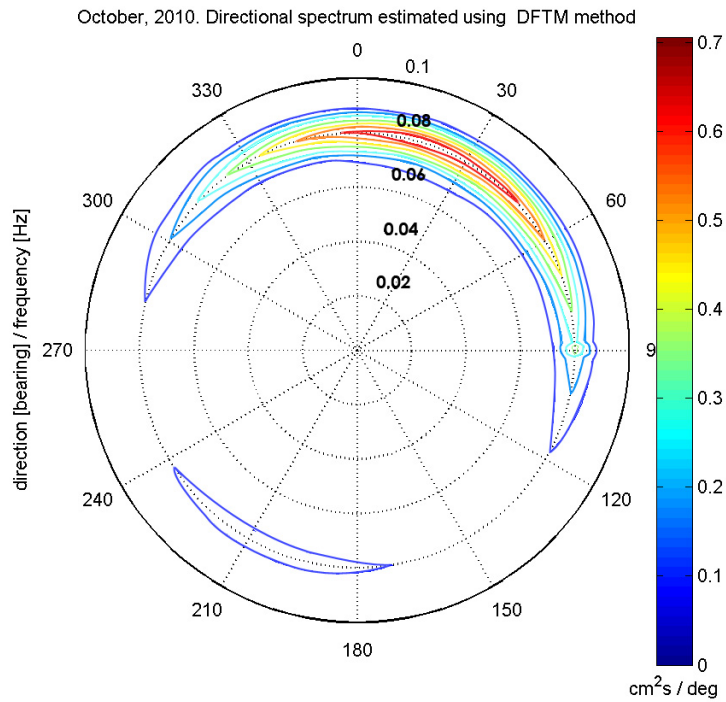


Figura 3.9: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos OCT002.tri

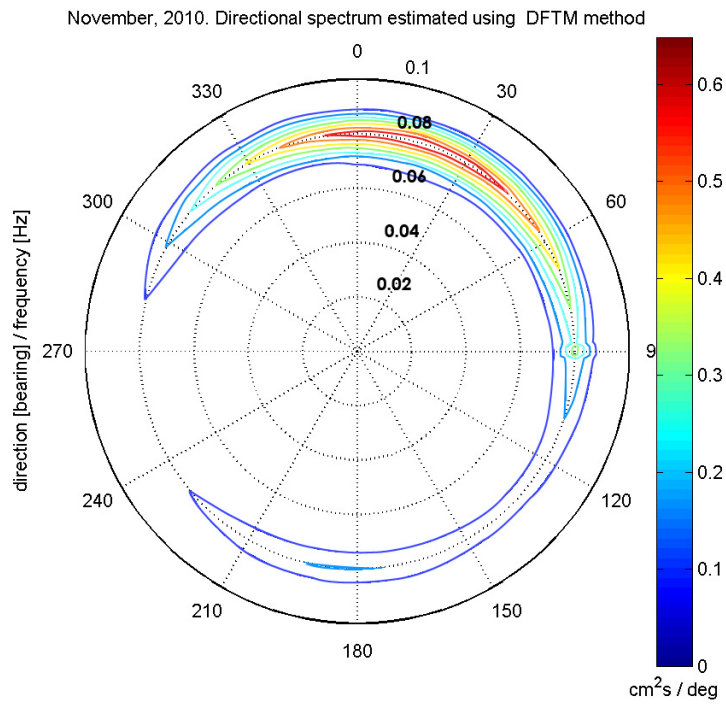


Figura 3.10: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos NOV002.tri

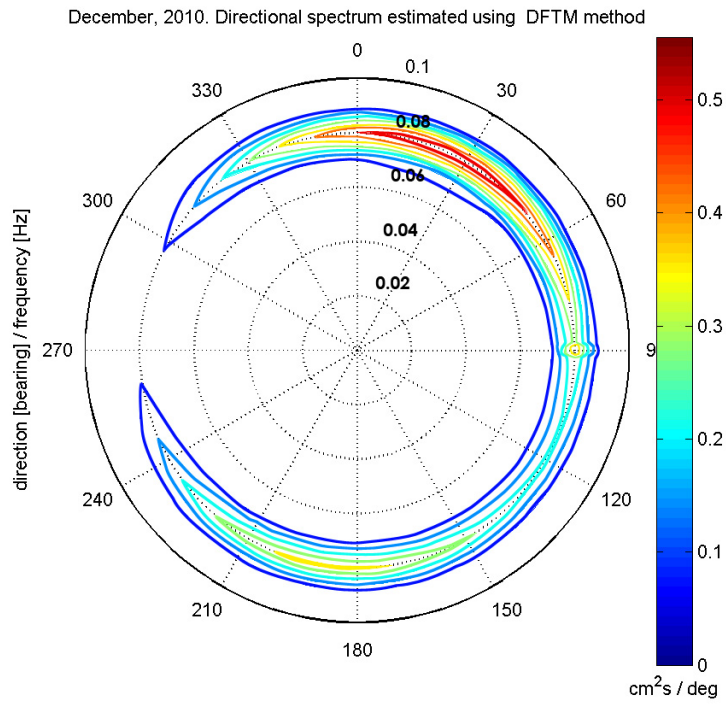


Figura 3.11: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos DEC002.tri

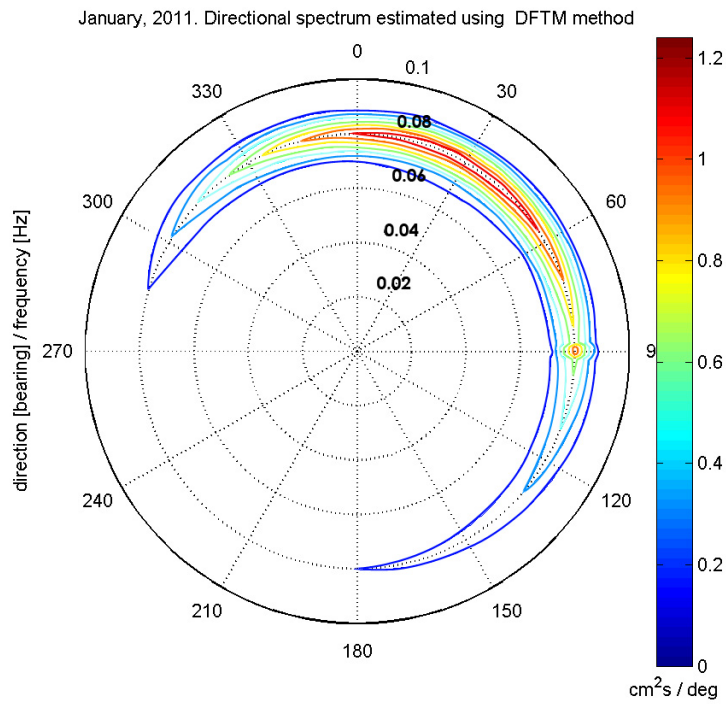


Figura 3.12: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos JAN001.tri

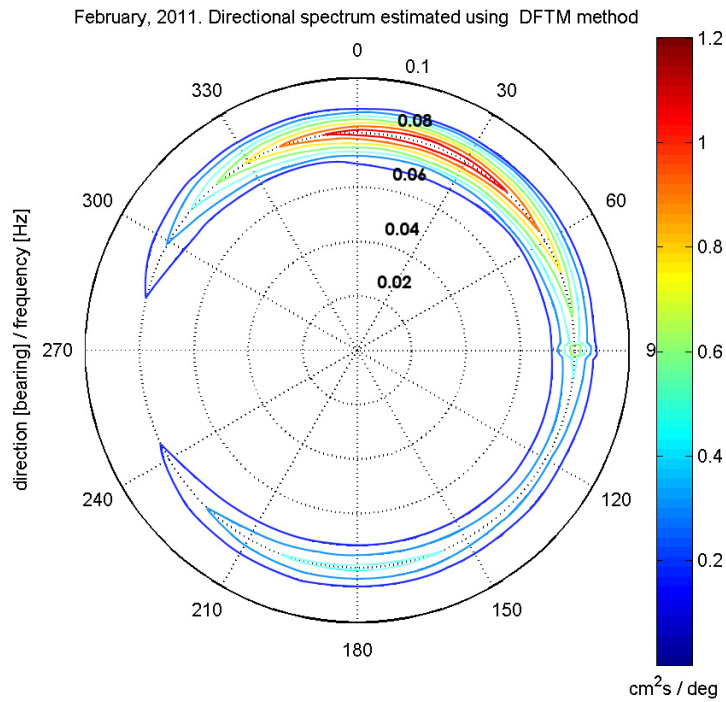


Figura 3.13: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos FEB001.tri

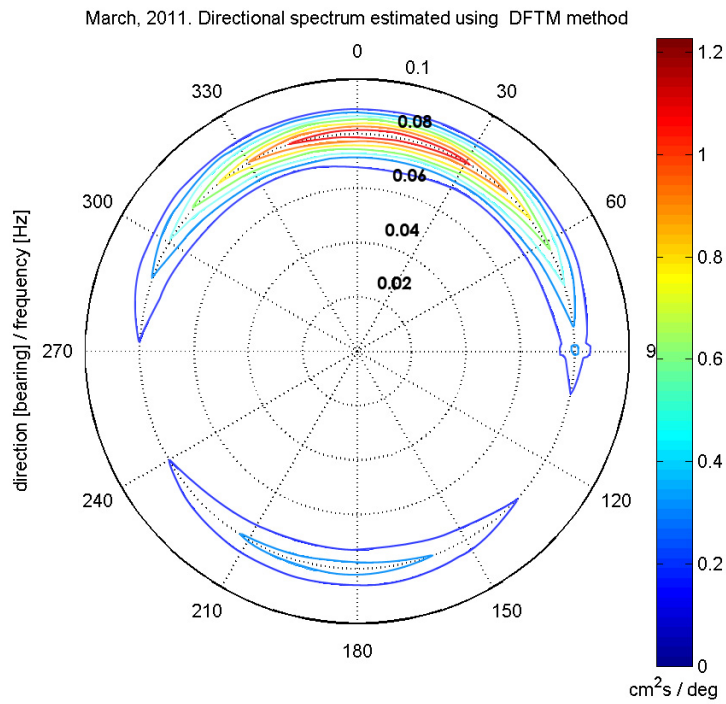


Figura 3.14: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos MAR001.tri

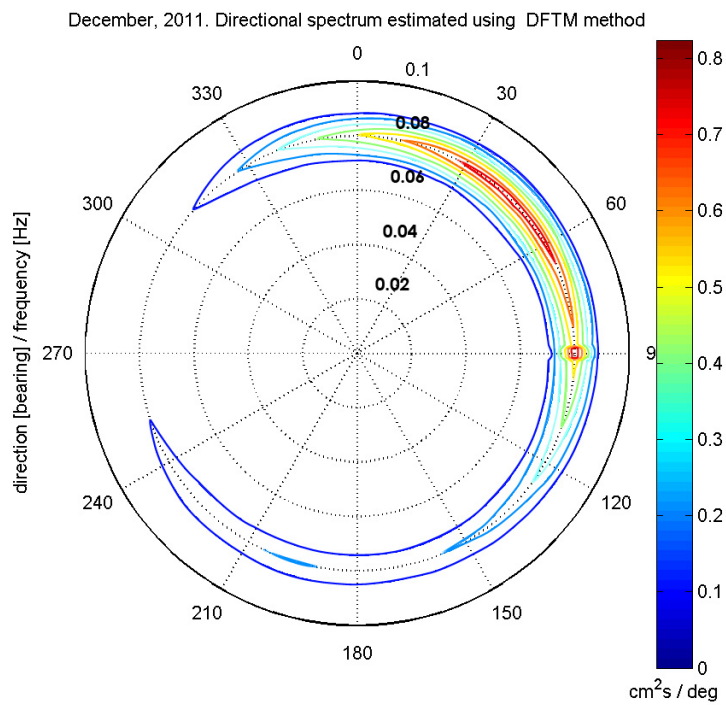


Figura 3.15: Distribución de la energía del oleaje para el conjunto de datos DEC001.tri

En la Figura 3.16 observamos el espectro direccional correspondiente al mes de Julio 2010. El gráfico ha sido ubicado en un mapa de la zona para demostrar que la dirección del oleaje es consistente con la orientación de la playa y observaciones geográficas de la zona.

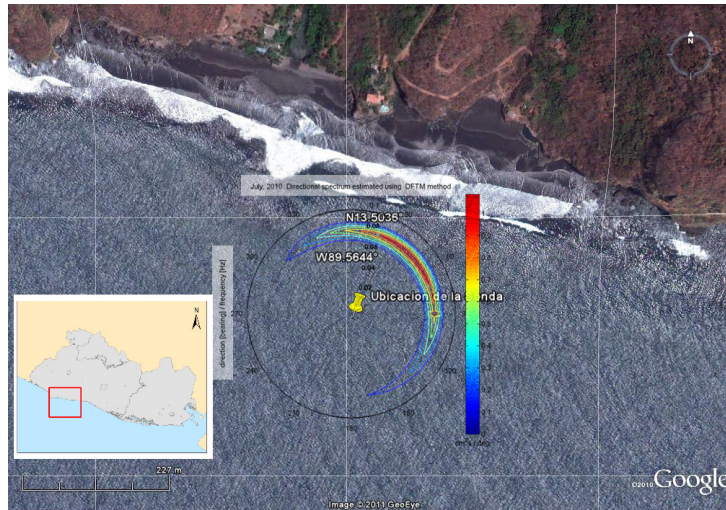


Figura 3.16: Espectro direccional ubicado en el mapa de la zona de estudio. Imagen editada por M. Alvarado

En la Figura 3.17 observamos un mapa de la dirección del viento en distintas zonas del país. La parte ampliada del mapa representa los datos de viento de la estación meteorológica de Acajutla para el mes de Febrero 2010, la dirección de donde proviene el viento esta indicada con una flecha roja. El viento en esa estación viene del Sur-Oeste, dirigiéndose al Noreste [26], siendo consistente con la dirección del espectro direccional obtenido para el mismo mes.

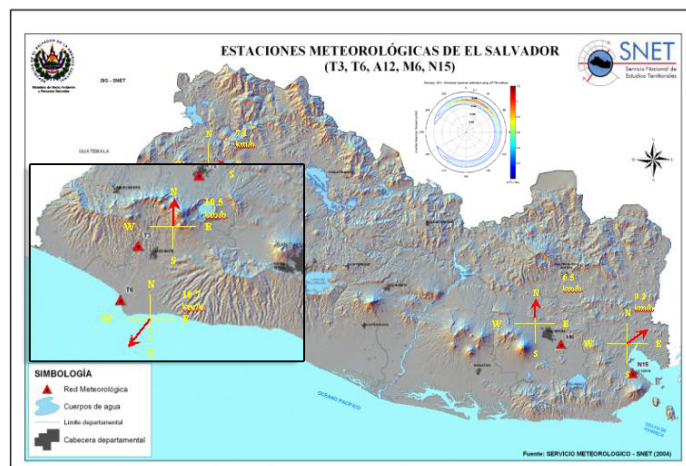


Figura 3.17: Mapa de las estaciones meteorológicas de El Salvador, dirección de viento. Modificada de [26].



### 3.5. Alturas significativas

Las alturas significativas y los periodos energéticos han sido calculados utilizando el método descrito en la sección 2.4.4 de este documento. La figura 3.6 muestra las alturas significativas promediadas cada 72 horas, las cuales varían desde 0.60 metros a 1.5 metros de altura, con un promedio anual de 1.1 metros.

En ambos años de estudio, existe un espacio temporal sin datos que consta desde principios de Mayo hasta finales de Julio, esto es debido a diferentes dificultades que se tuvieron para ingresar a la zona de estudio en la época lluviosa del año, que generalmente dura de Mayo a Octubre.

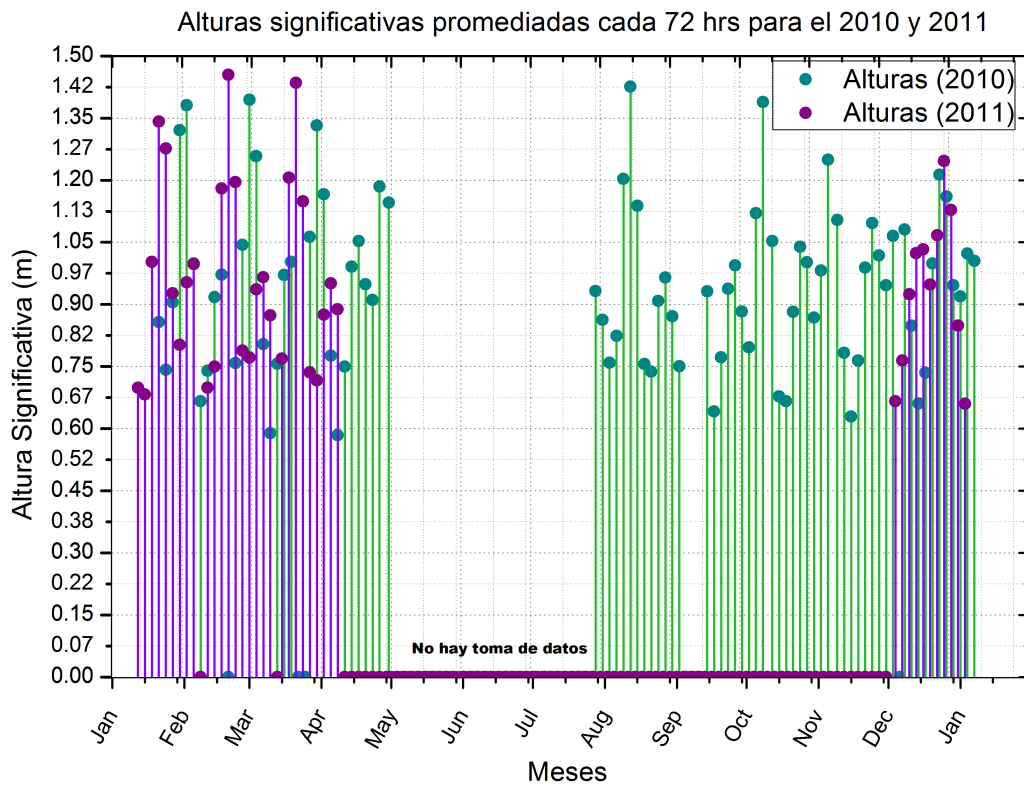


Figura 3.18: Gráfica de la Altura significativa ( $H_{m0}$ ) para los años 2010 y 2011, datos promediados cada 72 hrs.

### 3.6. Periodos energéticos de las olas.

La figura 3.7 muestra los periodos energéticos de las olas los cuales oscilan entre los 8.43 segundos a los 20.05 segundos, con un promedio anual de 12.5 segundos.

Igual que en la gráfica de la figura 3.6 existe un espacio temporal sin datos debido a las dificultades para entrar a la zona de estudio.

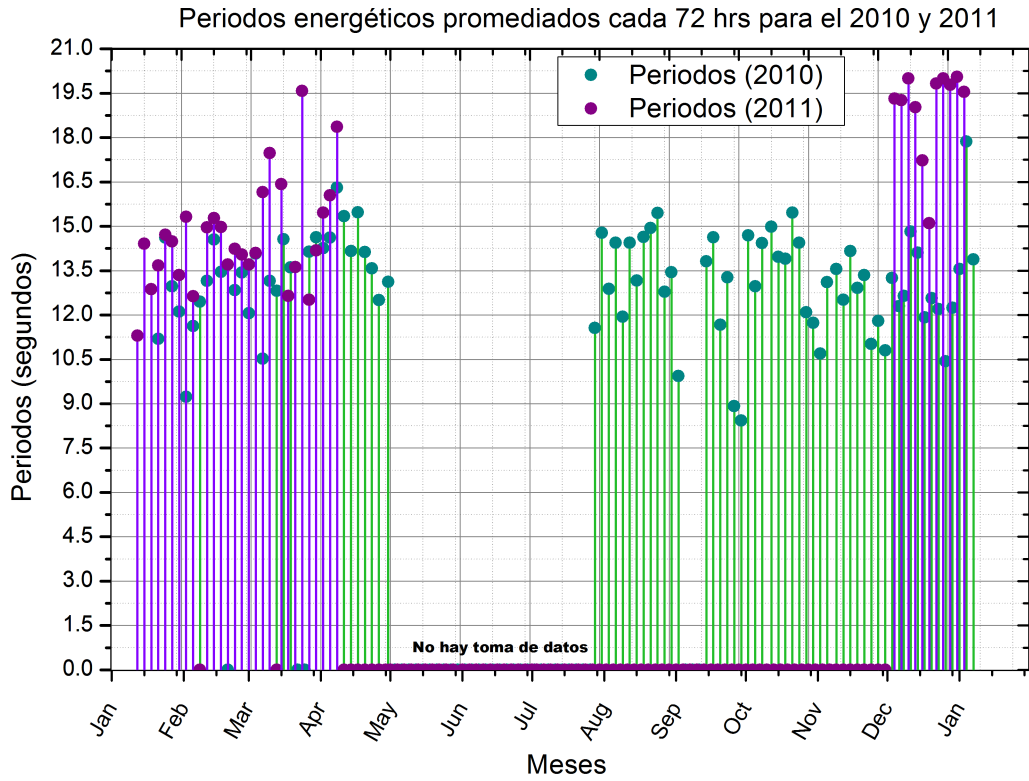


Figura 3.19: Gráfica del periodo energético ( $T_e$ ) de las olas para los años 2010 y 2011, datos promediados cada 72 hrs.

### 3.7. Potencial energético de las olas para los años 2010 y 2011

La figura 3.8 presenta el potencial energético de las olas para los años 2010 y 2011 medido en kilo watt por unidad de longitud de cresta de ola (metro). Los valores de potencia varían desde los 2.28 hasta los 16 KW/m, con un promedio anual de 10.1 KW/m. Estos valores concuerdan con el potencial esperado para las costas salvadoreñas, según otras investigaciones hechas en el área regional [25].

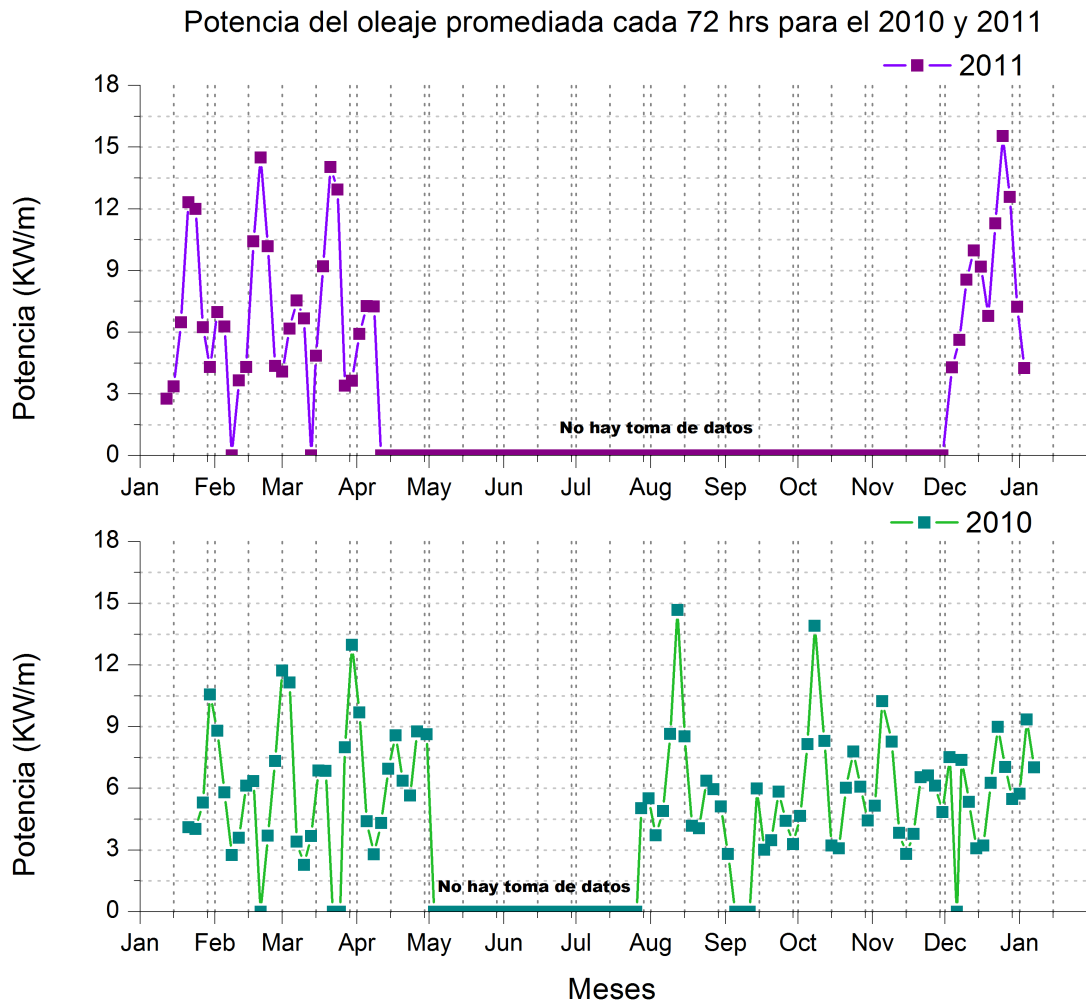


Figura 3.20: Potencia del oleaje para los años 2010 y 2011. Se presentan valores promediados cada 72 horas. a) Potencia para series de tiempo tomadas del 12/01/2011 al 03/01/2012. b) Potencia para series de tiempo tomadas del 21/01/2010 al 07/01/2011.

# Capítulo 4

## Conclusiones y recomendaciones

### 4.1. Conclusiones

- Los gráficos polares presentan una concentración de la energía en un intervalo de frecuencias de 0.06 a 0.1 Hz con un máximo de energía en 0.08 Hz. Este rango de frecuencias corresponde a olas generadas por el viento local [8].
- En los dos años de observación, la dirección de la componente más energética de las olas presenta una dirección predominante hacia el Noreste, con fluctuaciones de los  $0^\circ$  (directamente hacia el Norte) a los  $45^\circ$  (directamente hacia el Noreste) a lo largo de un año de observación. Estas variaciones corresponden al cambio en la dirección del viento durante las distintas estaciones del año [6]. En nuestra zona de estudio existen dos estaciones durante el año: la época lluviosa que comprende de Mayo a Octubre y la época seca que comprende del mes de Noviembre al mes de Abril. Durante los meses de Agosto y Octubre percibimos el cambio en la dirección de las olas, el cual asociamos al cambio en la dirección del viento. Los cálculos de la dirección del viento pueden observarse en los mapas contenidos en el Apéndice C de este documento [26].
- Los valores de  $H_{m0}$  encontrados las cuales varían desde 0.60 metros a 1.5 metros de altura, con un promedio anual de 1.1 metros. Los valores de  $T_e$  encontrados oscilan entre los 8.43 segundos a los 20.05 segundos, con un promedio anual de 12.5 segundos.
- El Potencial energético encontrado varía entre los 2.70 y 17 KW/m con un promedio anual de 10.1 KW/m. Estos valores concuerdan con el potencial esperado para las costas salvadoreñas, según otras investigaciones hechas en el área regional [25], y a su vez, representan potencias muy bajas comparadas con otras investigaciones [6] y [7].
- Es necesario realizar estudios batimétricos y tener un muestreo continuo de datos para poder verificar la variabilidad anual de la potencia de oleaje y poder afirmar si es factible la explotación de este recurso energético [6].

## 4.2. Recomendaciones

- Existen varios meses sin datos, a lo largo de los dos años tomados en cuenta en esta investigación. Por lo tanto es necesario mantener un muestreo continuo que permita captar la variabilidad anual del potencial del oleaje, para ello es esencial contar con más de un sensor para asegurar que siempre existirán instrumentos que nos permitirán realizar la investigación.
- Hacen falta estudios batimétricos, datos de la geología costera, tomar en cuenta la erosión y deposición de sedimentos a lo largo de la playa en estudio.
- El potencial energético asociado a la zona costera de Mizata es bajo, por lo tanto es necesario buscar otros sitios de estudio, los cuales presenten diferentes estructuras geológicas que favorezcan a un aumento en la altura del oleaje.
- Se necesita escoger un nuevo sitio de estudio tomando en cuenta la batimetría de la costa, la geología de la zona y el impacto ambiental y económico de la implementación de este recurso energético en ese mismo sitio.

# Bibliografía

- [1] SONTEK Technical Notes, SonWave-Pro: Directional Wave Data Collection, Marzo (2001).
- [2] NORTEK USA, PUV Wave Directional Spectra, How PUV Wave Analysis works. USA. (2002)
- [3] D. Johnson, Directional Wave Spectra Toolbox version 1.3 for Matlab: user manual, University of Western Australia, (2002)
- [4] Superintendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones, SIGET, Estadísticas Eléctricas: Avance primer semestre 2011. Diciembre 2011, El Salvador. p. 43 (2011)
- [5] J. Cruz, Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives, Cap. 4, p. 106-114, (2008)
- [6] P. Lenee-Bluhm *et al.*, Characterizing the wave energy resource of the US Pacific Northwest, Renewable Energy, Vol. 36, p. 2106-2119, (2011).
- [7] J Cruz, et al, Advances in Wave Resource Estimation: Measurements and Data Processing, Proceedings of the 6th European Wave and Tidal Energy Conference, p 1(2005)
- [8] E. Brown, A. Colling, D. Park, J. Phillips, D. Rothery, y J. Wright, Waves, Tides and Shallow - Water Processes, edited by G. Bearman, (The Opend University, Oxford, UK) p. 11, p.12,(2008)
- [9] R. Resnick, D. Halliday, K. S. Krane, Física, (Grupo Patria Cultural S.A de C.V, México, D. F) Vol. 1, Cap. 17, p 379, Vol. 1, Cap. 15, p 341.(2002)
- [10] A. Trujillo y H. V. Thurman, Essentials of Oceanography 9th Edition, (Pearson Education, Inc., New Jersey, U.S) Cap. 5, p. 156. (2008)
- [11] P. R. Pinet, Invitation to Oceanography 4th Edition, (Jones and Bartlett Publishers, Massachusetts, U.S) p. 234.(2006)
- [12] F. Beigbeder Atienza, Diccionario Politécnico de las Lenguas Españolas-Inglesas 3ra Edición, (Diaz de Santos, España, 2009).

- [13] R. H. Stewart, Introduction to Physical Oceanography, (Department of Oceanography, Texas A & M University) Cap. 16. **(2006)**
- [14] B. León, Wave Propagation and Group Velocity. (Academic Press Inc., New York, **1960**).
- [15] R. V. Petroni, Hidráulica Marítima de Estuarios, (Dunken, Buenos Aires) Cap. 5, p. 111. **(2005)**
- [16] SONTEK, Tritón Principles of Operation Manual, San Diego CA. USA. Operations, p. 12. **(2001)**.
- [17] NORTEK USA, Wave Measurements using the PUV Method, USA. **(2002)**
- [18] J. Guzmán Ramírez, O. I. Mejía Fuentes, P. J. Menjívar Pino, Evaluación del potencial Energético del Oleaje en las Costas de El Salvador. Universidad de El Salvador, Escuela de Ingeniería Mecánica, El Salvador, **(2006)**.
- [19] Peter V. O'neil, Matemáticas Avanzadas para Ingeniería, 6ta Edición, Cengage Learning Editores, S.A, Mexico, Cap. 3, p. 160 **(2008)**
- [20] J. Carlos Santamarina and Dante Fratta, Introduction to Discrete Signals and Inverse Problems in Civil Engineering, Cap. 5, p. 93 (Georgia Institute of Technology, **1998**)
- [21] W. J. Emery and R. E. Thomson, Data Analysis Methods in Physical Oceanography, 2nd Edition, (edited by ELSEVIER B.V., San Diego CA.) **(2004)**
- [22] Bulmer, M.G., Principles of Statistics, Dover, **(1979)**, pp. 75 a 79.
- [23] J. L. Hanson and H. C. Friebel, Coastal Wave Energy Dissipation Observations and STWAVE-FP Performance, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting & 2nd Coastal Hazards Symposium; Halifax, Nova Scotia, **(2009)**
- [24] Hidalgo—Olea, L. Análisis del potencial energético del oleaje. Aplicación a la isla de Lanzarote. Universidad Politécnica de Catalunya. **(2009)** Minos Thesis. pp 117.
- [25] T. Juárez Díaz, Determinación de la energía disponible del oleaje y su variabilidad espacial y temporal en el océano pacífico, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, Diciembre **(2011)**.
- [26] R. Zimmermann, Características Meteorológicas y Topográficas de tres zonas del país: Zona Costera, Zona del Valle interior y Zona del Valle interior Occidental, SNET, mapas 11 a 22, anexo III, **(2010)**.

# Apéndice A

## Ubicación de la sonda en zona de estudio



Figura A.1: Ubicación de la sonda Tritón ADV: específicamente en la zona costera de la playa Mizata, departamento de La libertad, ubicada en las coordenadas  $13^{\circ}30'08,07''$  latitud Norte y  $89^{\circ}33'51,5''$  longitud Oeste.



## Apéndice B

### Ubicación del anemómetro en zona de estudio



Figura B.1: Ubicación del Anemómetro instalado en la playa Mizata específicamente a 13,512072° latitud Norte y 89,600134° longitud Oeste. A 12 m sobre el nivel del mar.

## Apéndice C

Gráficas de la dirección del viento para la estación más cercana a Mizata, Estación T6. Datos obtenidos del SNET.

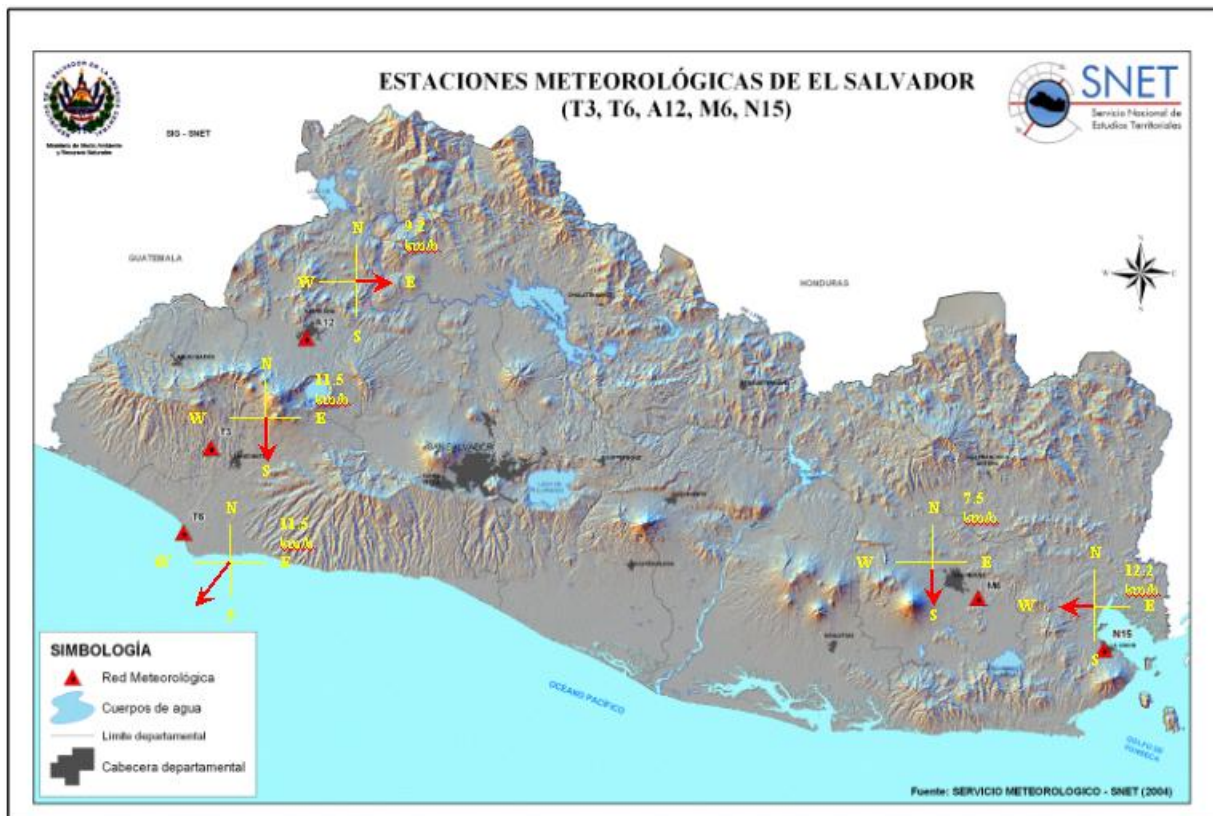


Figura C.1: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Enero. Obtenido de [26].

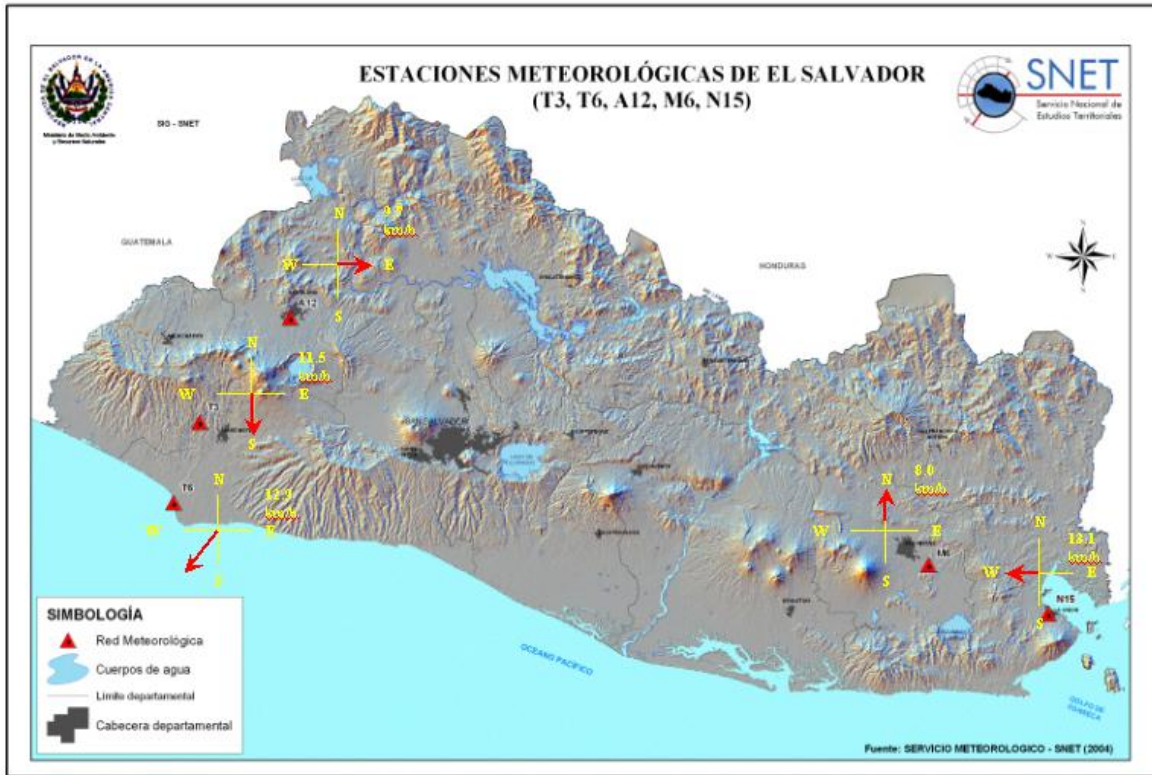


Figura C.2: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Febrero. Obtenido de [26].

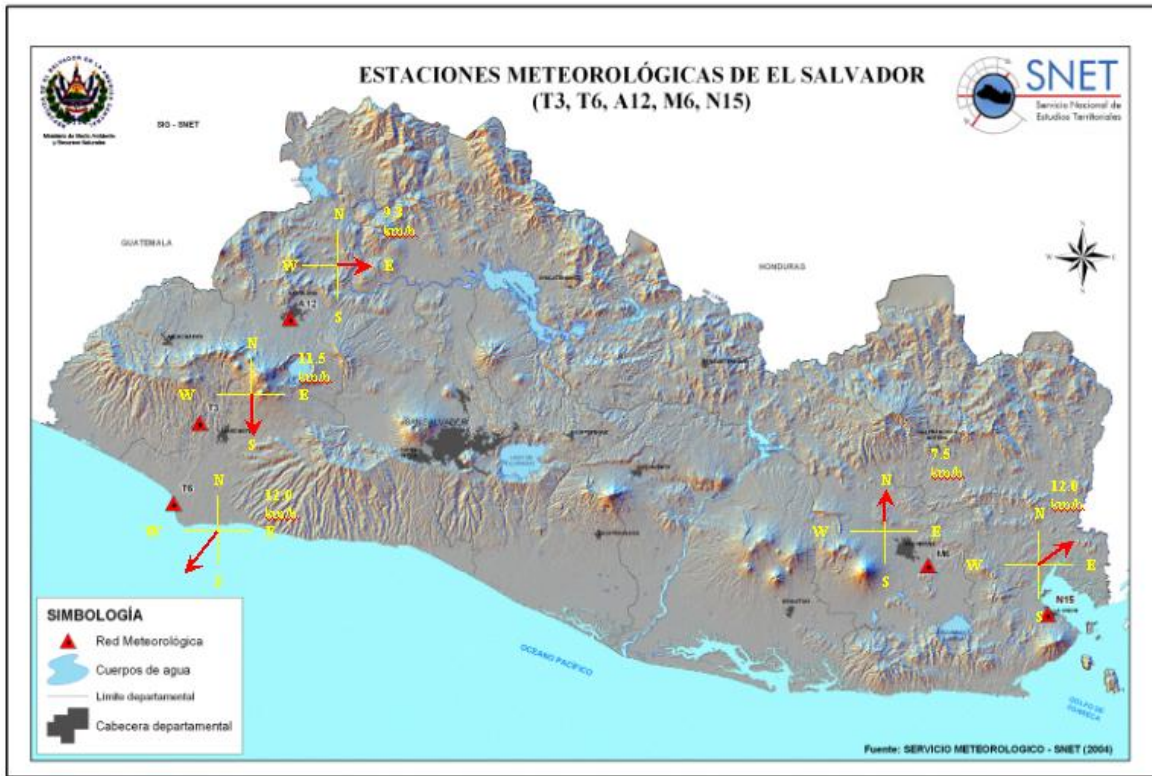


Figura C.3: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Marzo. Obtenido de [26].

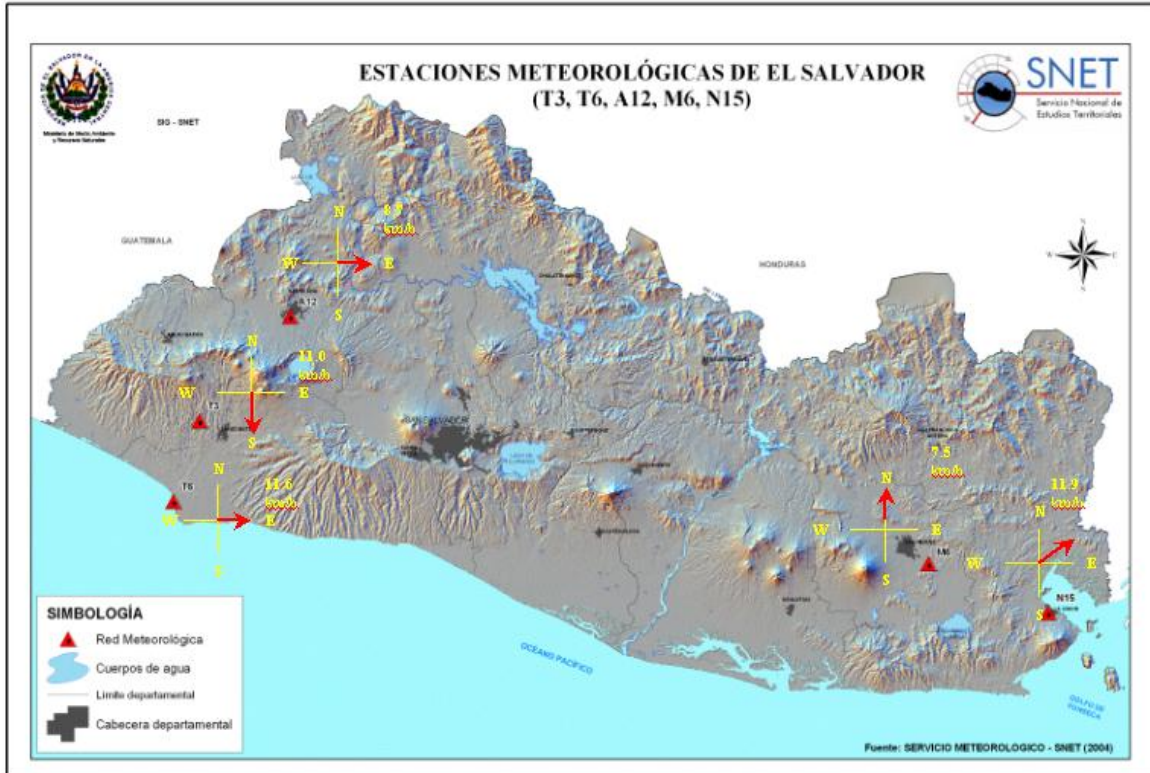


Figura C.4: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Abril. Obtenido de [26].

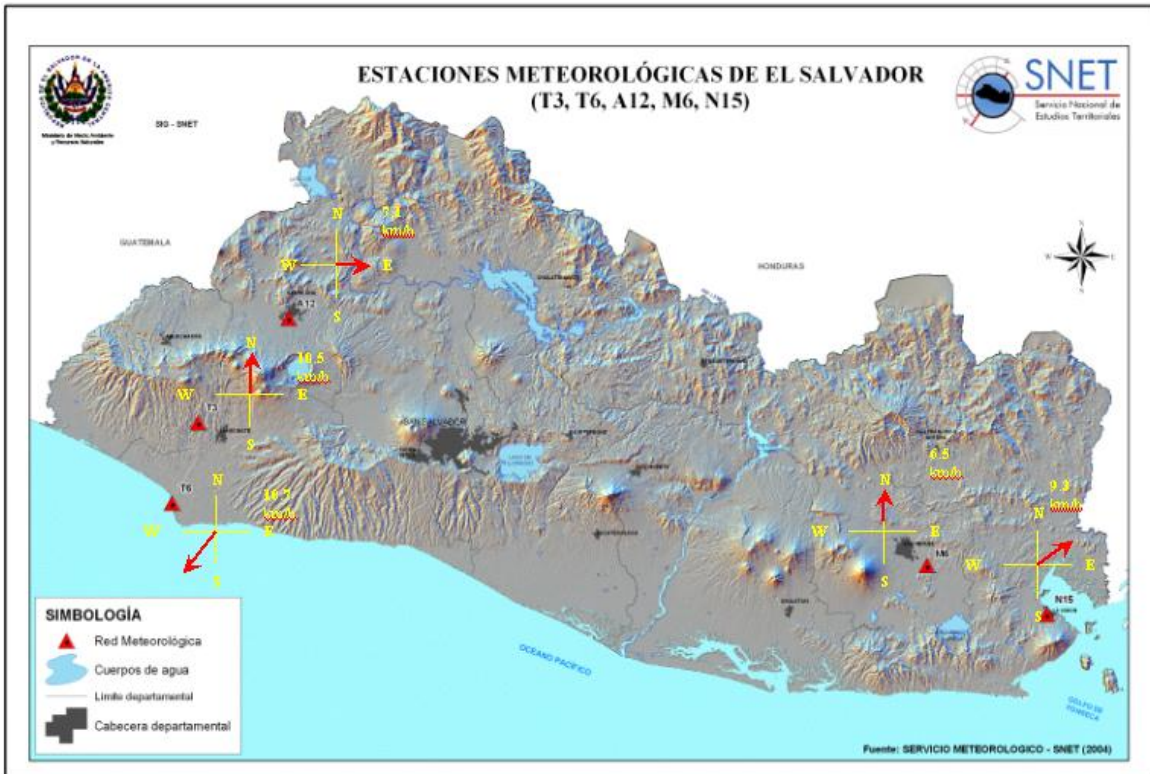


Figura C.5: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Mayo. Obtenido de [26].

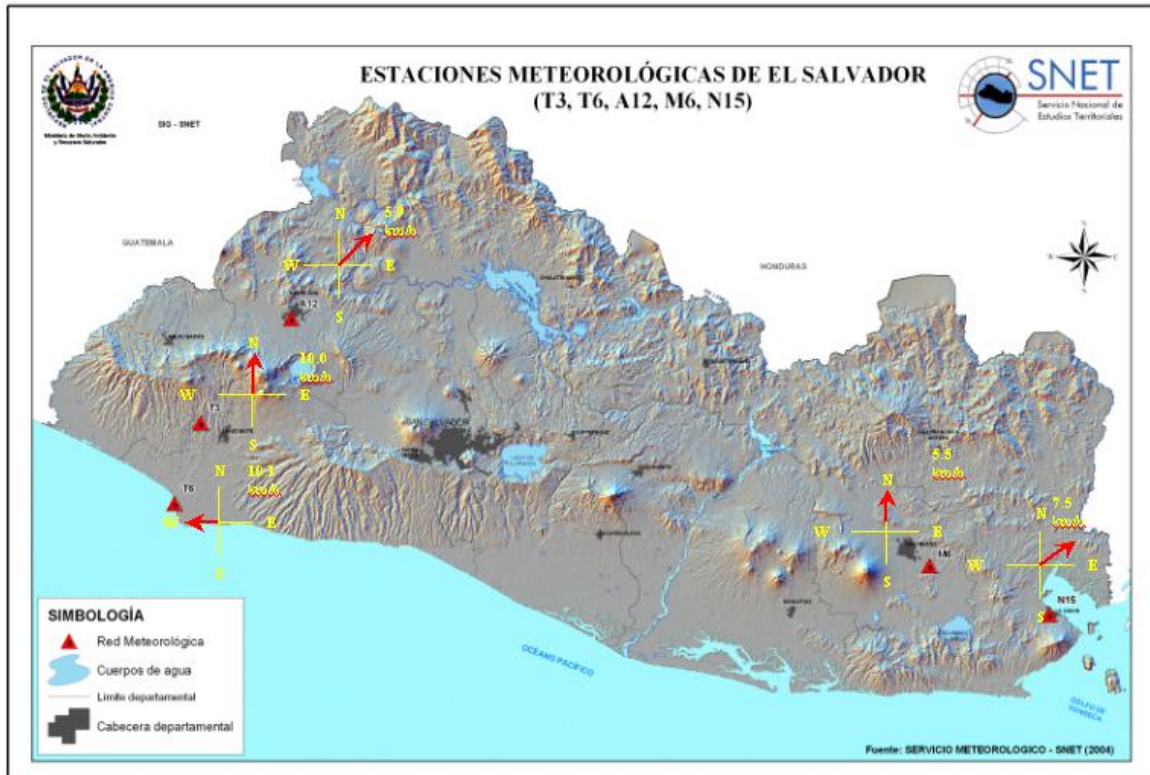


Figura C.6: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Junio. Obtenido de [26].

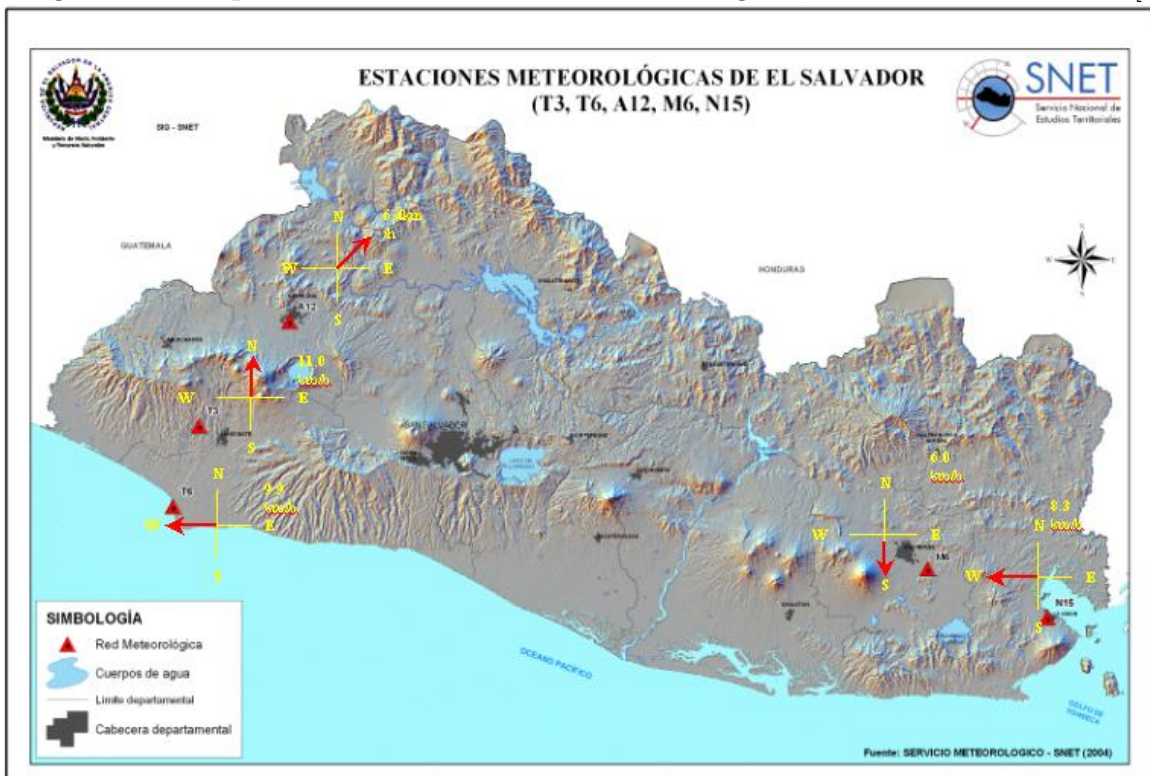


Figura C.7: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Julio. Obtenido de [26].



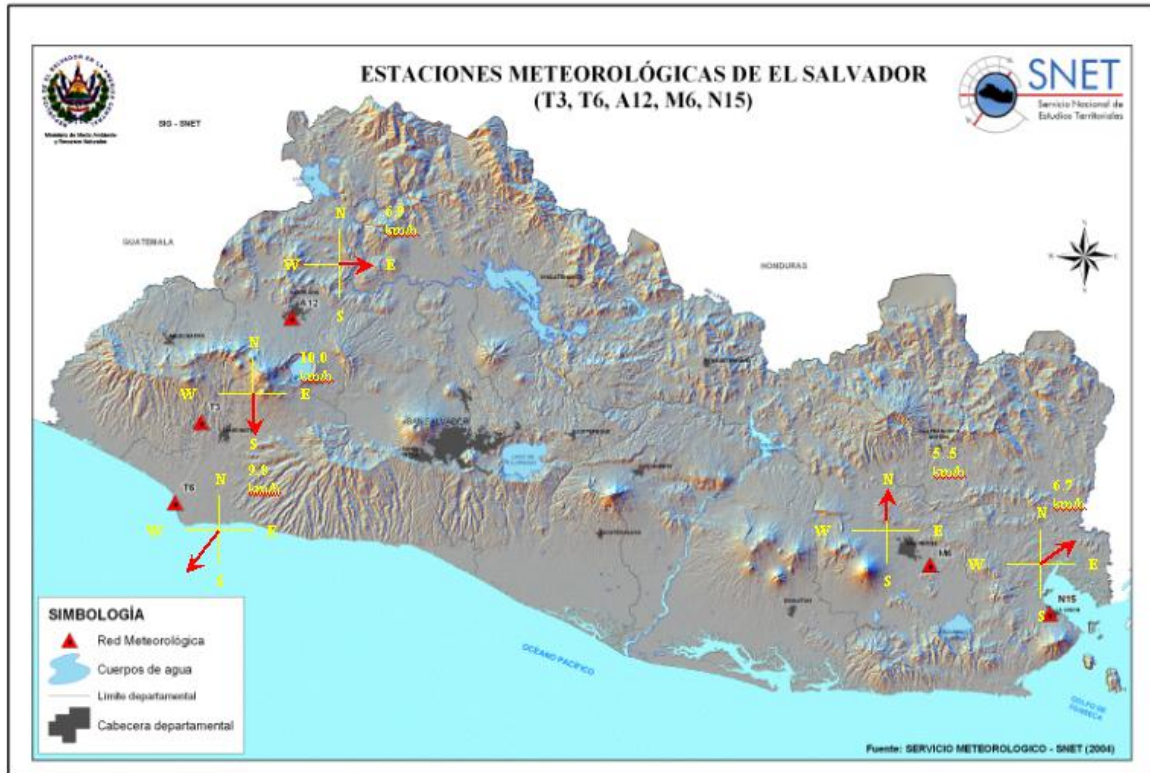


Figura C.10: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Octubre. Obtenido de [26].

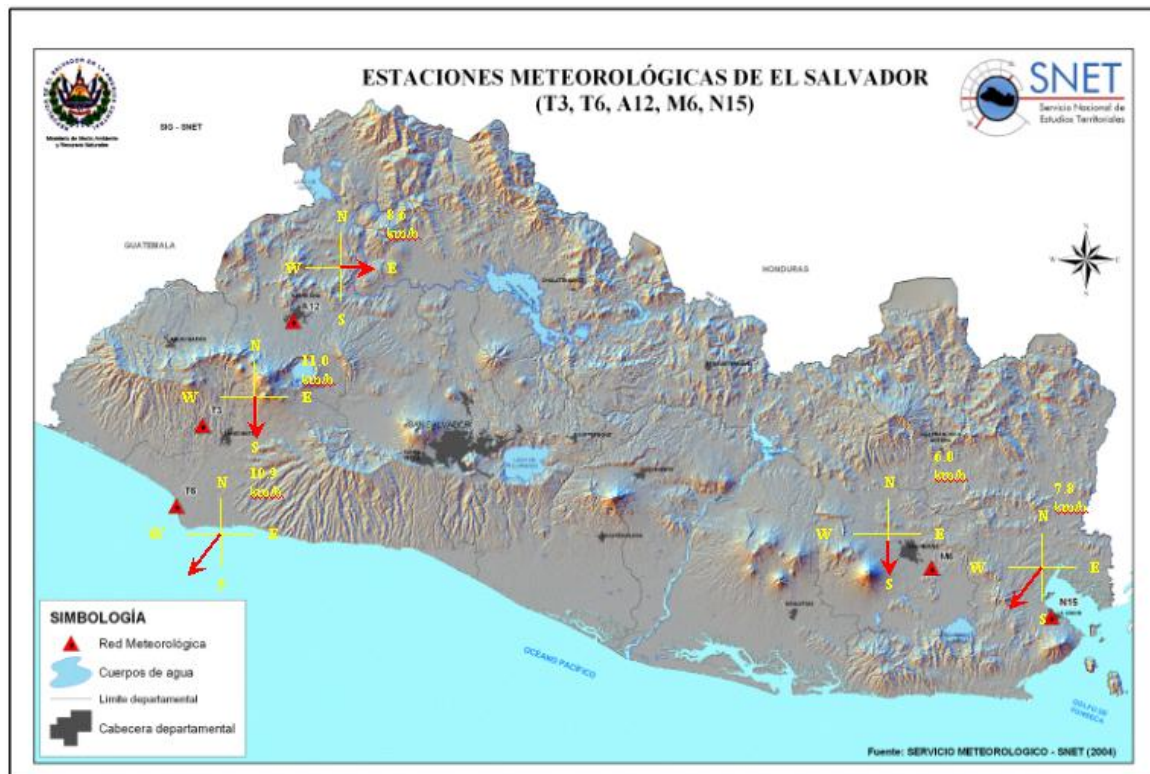


Figura C.11: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Noviembre. Obtenido de [26].

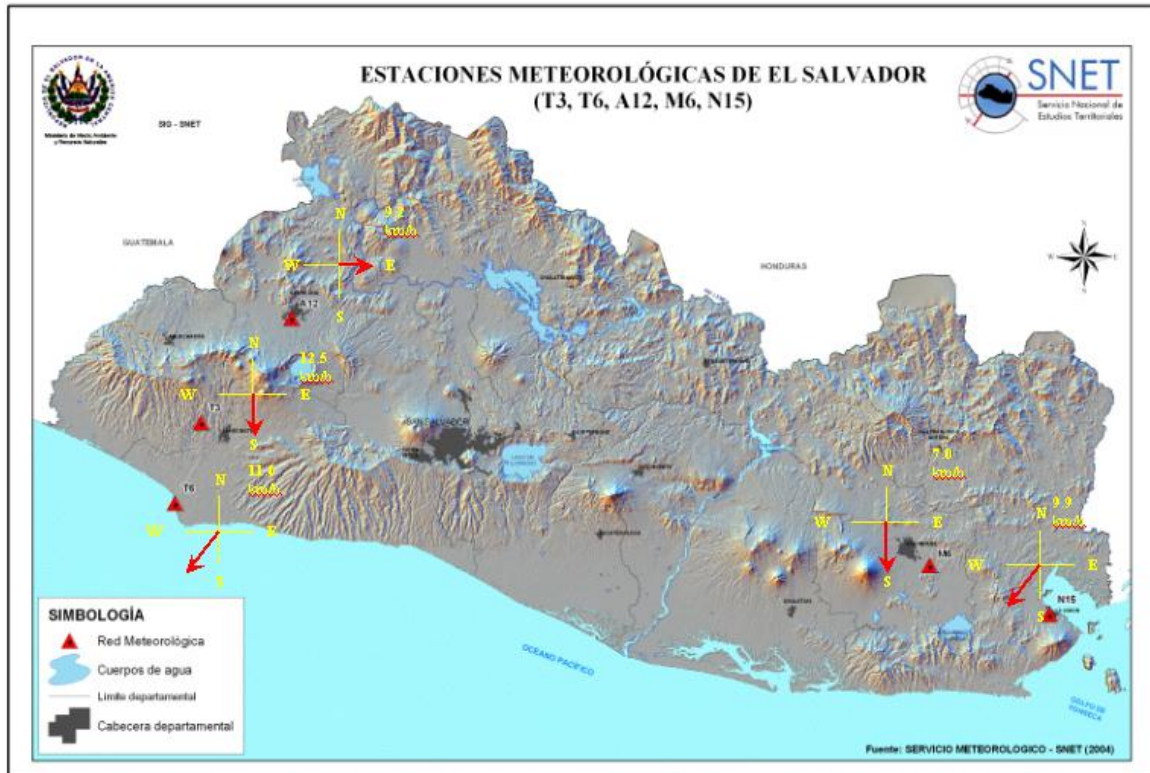


Figura C.12: Mapa de viento de estaciones Meteorológicas, de Diciembre. Obtenido de [26].

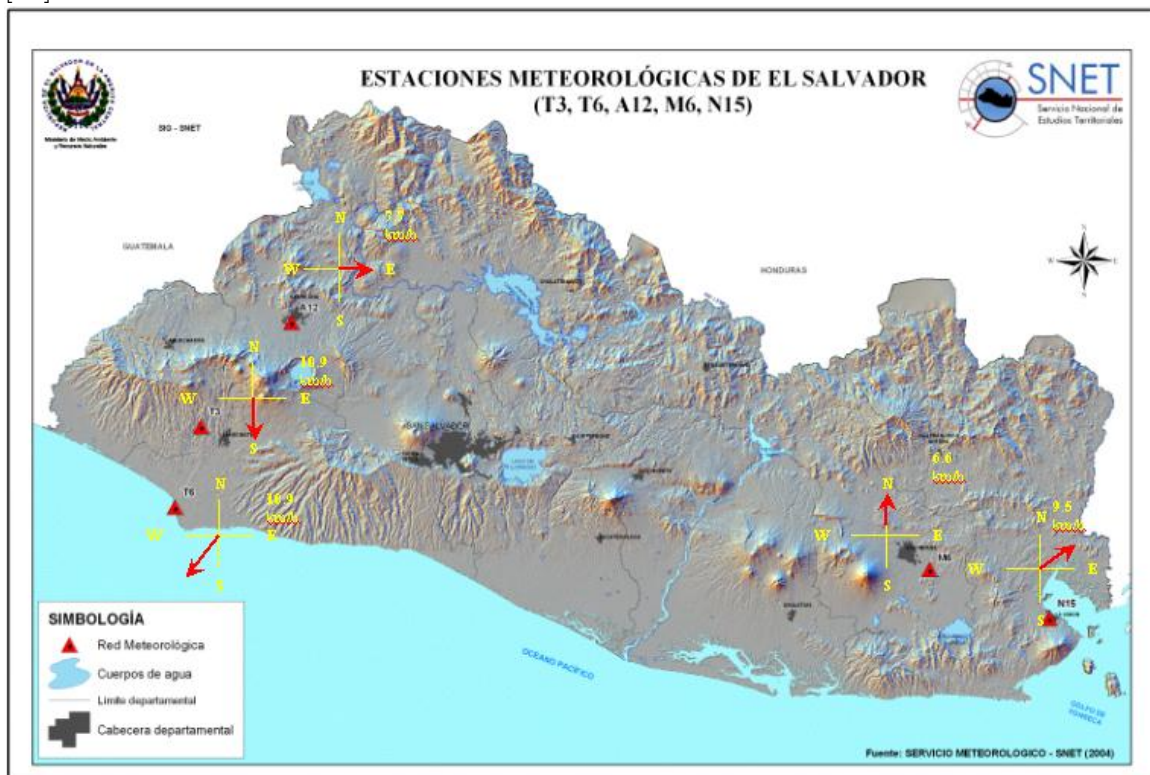


Figura C.13: Mapa Anual de viento de estaciones Meteorológicas. Obtenido de [26].