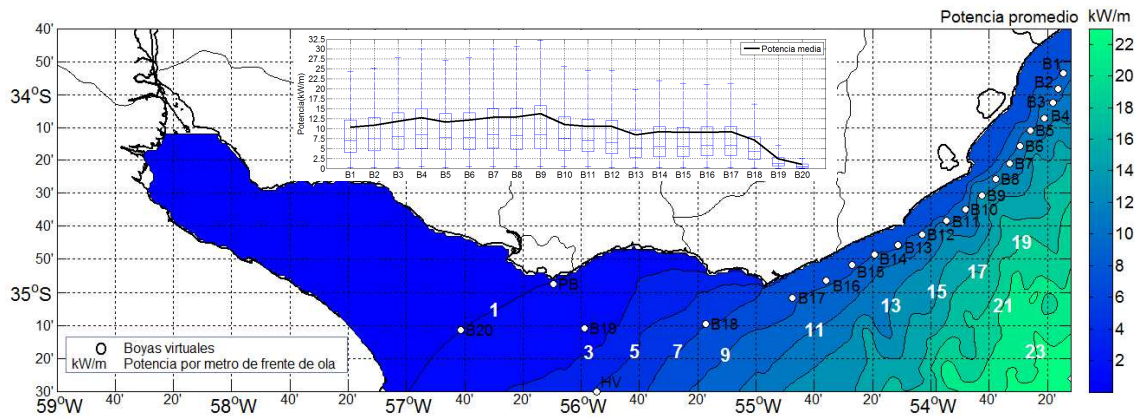


EVALUACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ DE URUGUAY



TESIS DE MAESTRÍA EN MECÁNICA DE LOS FLUIDOS APLICADA

NOVIEMBRE 2012

RODRIGO ALONSO HAUSER

TUTOR: DR. ING. LUIS TEIXEIRA

CO-TUTOR: DR. ING. SEBASTIÁN SOLARI

Resumen

El potencial undimotriz de Uruguay fue evaluado a partir de la información obtenida de modelar el oleaje correspondiente a toda la zona marítima del país y a un extenso período de tiempo.

El modelo empleado fue el modelo de tercera generación WAVEWATCH III (Tolman 1997, 1999a, 2009). El mismo, fue implementado en el clúster de servidores de cálculo Cluster-FING, permitiendo a partir de la información del campo de viento en superficie, calcular los estados de mar con una resolución espacial de 1.5 km en la plataforma continental de Uruguay y el estuario del Río de la Plata.

Los datos de entrada al modelo son los campos de viento a 10 metros de altura obtenidos del reanálisis NCEP-CFSR (Saha et.al., 2010). Los mismos, previo a su utilización, fueron sometidos a un análisis comparativo con datos de viento medidos en estaciones marítimas (Pontón de Recalada, Pilote Norden), en una boya oceanográfica y en estaciones costeras (Punta Brava y Carrasco). Concluyéndose que constituyen una buena representación del viento sobre el mar a los efectos de utilizarlos en la determinación del clima de oleaje a partir de modelación.

Para la calibración del modelo, los resultados obtenidos con el mismo fueron contrastados con mediciones in-situ y datos satelitales de oleaje. Las mediciones in-situ corresponden a una boya del tipo Waverider de la empresa Datawell localizada en la zona exterior del estuario y a un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) instalado en el estuario en las proximidades de Montevideo. Mientras que los datos satelitales fueron obtenidos de la base de datos del proyecto GlobWave (Ash et.al, 2010). Esta base de datos está conformada por mediciones obtenidas de distintos satélites, uniformizada a un mismo formato y con información sobre la calidad del dato. Previo a realizar la calibración del modelo, se analizó la concordancia entre los datos satelitales y las mediciones in-situ, obteniéndose buenos resultados.

Con el modelo calibrado se simuló el período 1980-2010. Las salidas del modelo son los campos de altura de ola significativa, período medio, dirección media, dispersión angular respecto a la dirección media, período pico, dirección pico y potencia del oleaje, así como los espectros completos en veinte boyas virtuales. Diecisiete de ellas, se localizaron distribuidas a lo largo de la costa atlántica en profundidades que se encuentran en el entorno de los 20 metros. Mientras que las tres restantes se localizaron distribuidas en el estuario. Tanto los campos como los espectros fueron obtenidos cada 3 horas.

En cada boya virtual y a partir de los espectros, se calcularon, además de la potencia, otros parámetros que brindan información sobre cuán dispersa se presenta la energía de un estado de mar y sobre sus características direccionales. De esta forma, se obtuvo una caracterización detallada del potencial undimotriz.

En las boyas virtuales correspondientes al tramo Punta del Este - La Paloma se obtuvieron valores de potencia media que varían entre 8.5 y 9.3 kW/m, mientras que en el tramo La Paloma - Chuy se obtuvieron valores de potencia media que varían entre 10.4 y 13.8 kW/m.

Integrando estos resultados se obtiene que a profundidades de 20 metros y a lo largo de los 200 km de costa atlántica, la energía media anual del oleaje es de 19.3 TWh, valor que duplica el actual consumo anual de energía eléctrica del país.

En la plataforma continental, a mayores profundidades, el potencial aumenta. En este sentido se obtuvo una potencia promedio de 20 kW/m a 70 km de la costa y una potencia promedio de 30 kW/m a 200 km de la costa. Por el contrario, adentrándose en el estuario, el potencial decae fuertemente, obteniéndose valores de potencia media en la zona media e interior del estuario un orden menor que los valores obtenidos en la plataforma continental.

En cuanto a la variación estacional del recurso, se obtuvo que el 56 % de la energía media anual se debe al oleaje que tiene lugar en otoño e invierno y que en estas estaciones predomina el oleaje del sureste a diferencia de las estaciones de primavera y verano donde predomina el oleaje del este. Mientras que en lo que refiere a la variación inter-anual, se destaca que la misma es poco significativa, siendo la desviación estándar de la potencia media anual menor al 10% de su valor promedio.

De esta forma, se evaluó el potencial energético de un recurso renovable y autóctono, cuya tecnología de aprovechamiento se encuentra experimentando un proceso de acelerado desarrollo y que se presenta como una nueva alternativa plausible de contribuir a una matriz energética nacional sostenible.

Agradecimientos

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por financiar, a través del primer llamado del Fondo Sectorial de Energía, el proyecto¹ en el cual se enmarcó este trabajo de tesis y especialmente por el apoyo brindado mediante el otorgamiento de una beca de posgrado.

A Luis Teixeira por ser el tutor de este trabajo y por la confianza y apoyo que siempre me brindó desde el primer día que ingresé al IMFIA y comencé a trabajar con él.

A Sebastián Solari por ser el co-tutor de este trabajo y por todo lo que he aprendido las veces que me ha tocado trabajar con él.

A Alejandro Gutiérrez, Gabriel Cases y Álvaro Díaz por la ayuda brindada en la recopilación, procesamiento y análisis de los datos de viento.

A Gabriel Usera, Gonzalo Rodríguez y Santiago Tabarez por su disposición y paciente ayuda para solucionar los distintos problemas informáticos que se suscitaron.

Al resto de los compañeros del IMFIA en general y en particular aquellos con quien comparto oficina y almuerzos, y que hacen más amenas las jornadas.

Finalmente quiero agradecer muy especialmente a mis padres Daniel y Patricia por su constante preocupación, interés y apoyo en todo lo que hago, no siendo este trabajo una excepción, y a Alejandra por su afectuosa compañía en todo momento y por su respeto al tiempo que le he dedicado a esta tarea.

¹Proyecto ANII_FSE_2009_12_1: *URU-WAVE Evaluación de la utilización de la energía de las olas en Uruguay*

Contenido

Resumen.....	1
Agradecimientos	3
1 Introducción	9
2 Marco Teórico	15
2.1 Marco conceptual para el análisis del oleaje y su energía.....	15
2.1.1 Definición y tipos de oleaje	15
2.1.2 Modelo aleatorio en amplitud y fase	16
2.1.3 Espectro.....	17
2.1.4 Parámetros descriptores.....	18
2.1.5 Teoría lineal.....	21
2.1.6 Energía.....	23
2.2 Modelación del oleaje.....	26
2.2.1 Tipos de modelos	26
2.2.2 Ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje.....	31
2.2.3 WAVEWATCH III Versión 3.14	40
3 Procesamiento de datos.....	49
3.1 Vientos	49
3.1.1 Introducción	49
3.1.2 Metodología	49
3.1.3 Datos e Información Utilizada.....	52
3.1.4 Resultados	54
3.1.5 Conclusiones.....	85
3.2 Oleaje	87
3.2.1 Medidas in-situ.....	87
3.2.2 Sensoramiento remoto	101
4 Modelo URU-WAVE.....	123
4.1 Generalidades	123
4.2 Grillas de cálculo	125
4.3 Batimetría y línea de costa.....	127
4.4 Análisis comparativo	129
4.4.1 Introducción	129
4.4.2 Metodología	129

4.4.3	Resultados	130
4.4.4	Conclusiones.....	145
4.5	Calibración.....	146
4.6	Resultados	148
5	Caracterización del potencial undimotriz	155
5.1	Potencial del recurso.....	155
5.2	Análisis direccional	160
5.3	Dispersión típica en frecuencias y direcciones.....	163
5.4	Variación estacional	164
5.5	Variación interanual	168
5.6	Síntesis de resultados.....	169
6	Conclusiones.....	173
	Referencias Bibliográficas	177
	Anexo 1. Variación estacional del viento	185
	Anexo 2. Carrasco sin corregir vs. Reanálisis interpolado.....	190
	Anexo 3. Análisis de las calmas en Carrasco	194
	Anexo 4. Boya Oceanográfica (Proyecto:FREPLATA-FFEM) vs. Reanálisis Interpolado.	195
	Anexo 5. Clima de olas en Hidrovía. Resultados Complementarios.	199
	Anexo 6. Análisis de la batimetría de la grilla local LOC1.5.....	201
	Anexo 7. Análisis comparativo. Series completas.....	202
	Anexo 8. Evolución de la tormenta del 23/8/2005.	217
	Anexo 9. Climas de olas en boyas virtuales.....	222
	Anexo 10. Mapa regional de potencia media del oleaje.....	242
	Anexo 11. Potencial undimotriz en boyas virtuales.....	244

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1 Introducción

La energía de las olas es una forma indirecta de la energía solar. Las diferencias de temperatura en la Tierra generan el viento que al soplar sobre los cuerpos de agua dan lugar al oleaje. Una vez desarrolladas, las olas pueden propagarse largas distancias en aguas profundas disipando muy poca energía. Esta cualidad es la que hace que el recurso undimotriz se presente de forma más concentrada que otras fuentes de energía como la eólica o la solar. A nivel global, se estima un potencial aprovechable con las tecnologías actuales de entre 140 y 750 TWh/año (ETNWG, 2003). A largo plazo, es esperable que el desarrollo tecnológico permita aumentar el potencial aprovechable 2 o 3 veces más (Thorpe, 1999) lo que equivale al 10 % del consumo energético mundial.

La primer patente de un dispositivo para convertir la energía de las olas data de 1799, pero recién en la década de los 70, y a raíz de la crisis del petróleo, comenzó un proceso intensivo de investigación al respecto. Prueba de ello, es el trabajo de Salter (1974) publicado en la reconocida revista científica *Nature*. En el mismo se presenta un dispositivo, ensayado en un canal de olas de laboratorio, capaz de aprovechar un alto porcentaje de la energía de las olas incidentes. Si bien, desde ese entonces ha resultado claro que alcanzar los requisitos de fiabilidad y robustez necesarios para la explotación comercial no es una tarea sencilla, en la actualidad la obtención de energía de las olas es objeto de creciente atención y numerosos países realizan esfuerzos en investigación, desarrollo e innovación para su aprovechamiento.

El Uruguay carece de la explotación de recursos energéticos fósiles y ha maximizado el uso de sus recursos macro-hidráulicos, resultando imperioso explotar energías renovables y autóctonas. En este sentido y considerando el territorio marítimo del cual se dispone, las fuentes de energía del mar aparecen como una alternativa a evaluar. En este contexto el IMFIA ha comenzado a trabajar desde inicios del 2011 en el proyecto *URU-WAVE Evaluación de la utilización de la energía de las olas en Uruguay* financiado por el Fondo Sectorial de Energía de la ANII. Este trabajo de tesis se enmarca en dicho proyecto para dar cumplimiento a uno de sus objetivos principales: evaluar el potencial del recurso.

La caracterización del recurso undimotriz se realizó a partir de la obtención mediante modelación numérica de 31 años de estados de mar en todo el estuario del Río de la Plata y fundamentalmente en la plataforma continental atlántica, zona donde era esperable obtener un mayor potencial. El modelo utilizado fue el WAVEWATCH III versión 3.14 (Tolman 2009) y se ejecutó en el clúster de servidores de cálculo Cluster-FING. Los datos de viento en superficie que alimentaron al modelo son datos del reanálisis NCEP-CFSR (Saha et.al., 2010). Los resultados obtenidos se contrastaron con datos de oleaje medidos in-situ y con datos obtenidos desde satélites mediante la técnica de altimetría con radar. Dado que los datos de mediciones in-situ disponibles fueron obtenidos por equipos localizados dentro del estuario, los datos satelitales son de suma relevancia pues permitieron verificar la capacidad del modelo para representar el oleaje en la plataforma continental.

En general, es común que no se cuente con suficiente información del oleaje obtenida de mediciones directas. Debido a esto, en distintos lugares del mundo se ha recurrido a la

información obtenida de los modelos numéricos para evaluar el potencial energético del oleaje. Iglesias et. al. (2009) para Galicia, Stopa et.al (2011) para Hawaii y Saket y Etemad-Shahidi (2012) para el golfo de Omán, son algunos de los muchos ejemplos identificados en la recopilación bibliográfica realizada. También a partir de modelación se han realizado trabajos como el de Arinaga y Cherung (2012) en el que evalúan el recurso undimotriz a nivel global. Los resultados obtenidos a partir de estos modelos globales dan una idea general de la distribución del recurso undimotriz en el mundo permitiendo identificar las regiones más promisorias, pero a nivel local solamente pueden considerarse como una primera aproximación del potencial del recurso. Estos atlas globales de oleaje identifican a la zona occidental del Atlántico Sur en las latitudes de la costa uruguaya como una zona de potencial undimotriz moderado. Obtener un conocimiento más preciso y detallado del recurso requiere necesariamente, como se realizó en este trabajo de tesis, recurrir a modelos que resuelvan con mayor resolución los procesos de generación y transformación del oleaje en la zona de estudio, que incorporen información batimétrica local y cuyos resultados sean contrastados con información local del oleaje.

Dragani et. al.(2010) determinaron mediante modelación numérica el oleaje local en el Río de la Plata correspondiente al período 1971-2005. Si bien su objetivo fue analizar cambios en el clima y no evaluar el potencial undimotriz, este trabajo se puede considerar como un antecedente directo a este trabajo de tesis. De todas formas, existen diferencias significativas entre uno y otro trabajo. Estas diferencias radican en la consideración del mar de fondo, la resolución espacial de los campos de vientos y la utilización de datos satelitales para calibrar el modelo y analizar sus resultados. Mientras que para Dragani et. al. el mar de fondo no es relevante pues se enfocan en analizar cambios en el oleaje local, si es relevante a los efectos de evaluar el potencial undimotriz. Por esta razón, se consideró que el dominio de cálculo correspondiente a la grilla más gruesa sea un dominio global. En lo que respecta a la resolución del campo de vientos, Dragani et.al. utilizaron los datos del reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay, 1996) cuya resolución espacial es de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ mientras que la resolución de los datos del reanálisis NCEP/CFSR es de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Este aumento en la resolución del campo de vientos tiene una incidencia notoria y positiva en los resultados de los modelos de oleaje. Finalmente, se destaca la utilización de los datos satelitales ya que permiten verificar las cualidades de los resultados en todo el dominio de cálculo y no solamente en unos pocos puntos.

Este documento se estructura en seis capítulos, incluyendo este primero de introducción. En el segundo capítulo se presenta un marco teórico sobre la descripción, análisis y modelación del oleaje y su energía. Este capítulo se divide en dos apartados. El primero comienza definiendo al oleaje, para luego presentar el modelo aleatorio en amplitud y fase que permite conceptualizar un estado de mar y describirlo en términos estadísticos a partir de un espectro. A continuación se define el espectro de oleaje y los distintos parámetros que se utilizan para describir un estado de mar. Posteriormente se describe brevemente la teoría lineal de las olas para finalmente definir la energía de un estado de mar y mostrar las formas de calcularla. El segundo apartado del marco teórico trata sobre la modelación del oleaje. Se inicia con una discusión sobre los tipos de modelos existentes, luego se presenta la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje y finalmente se presentan las principales características del WAVEWATCH III.

En el tercer capítulo, titulado procesamiento de datos, se presentan los distintos análisis realizados a los datos de viento y oleaje recopilados. En un primer apartado se presenta una comparación, aplicando distintos métodos estadísticos, de los datos de viento de reanálisis con los datos disponibles de mediciones del viento en el mar o en estaciones costeras. En un segundo apartado se abordan los datos de oleaje. Por un lado se presenta el clima de olas y la caracterización del recurso undimotriz en los dos puntos donde se cuenta con mediciones directas y por otro se describen y analizan los datos satelitales utilizados para contrastar los resultados del modelo en todo el dominio de cálculo.

El cuarto capítulo trata sobre el modelo de oleaje implementado y al cual se lo identificará como modelo URU-WAVE. Se describen las grillas de cálculo, se presenta la información batimétrica utilizada, se presenta el análisis realizado para escoger entre las distintas parametrizaciones que ofrece el WAVEWATCH III para representar los distintos procesos involucrados en la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje, se presenta la calibración del modelo y finalmente se presentan los resultados obtenidos.

Finalmente en el capítulo quinto se presenta la caracterización del potencial undimotriz de Uruguay realizada a partir de los resultados del modelo URU-WAVE y en el capítulo sexto se recogen todas las conclusiones obtenidas a lo largo de este trabajo de tesis.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2 Marco Teórico

2.1 Marco conceptual para el análisis del oleaje y su energía

2.1.1 Definición y tipos de oleaje

Los distintos tipos de ondas que involucran el movimiento vertical de la superficie libre del océano se pueden clasificar en función de su período característico. En la Figura 1 se presenta la clasificación propuesta por Munk (1950). En el gráfico se indica el nombre atribuido a cada tipo de onda así como la correspondiente fuerza generadora. El eje de las ordenadas corresponde a una escala de energía arbitraria.

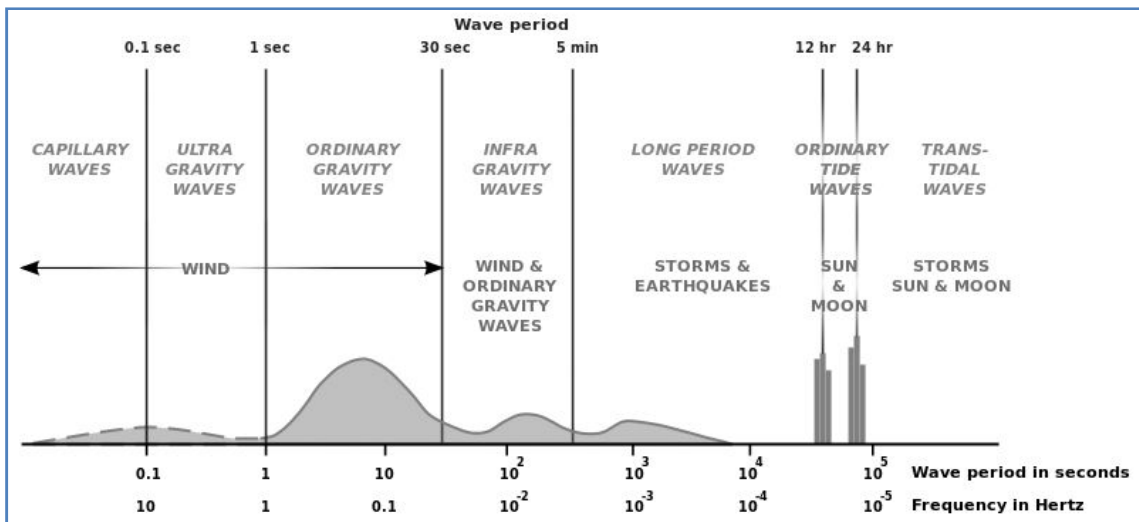


Figura 1.- Espectro típico del movimiento vertical de la superficie libre del océano. Obtenido de Munk (1950).

El oleaje está conformado por ondas denominadas *ordinary gravity waves* según la clasificación de la Figura 1. Es decir, ondas que involucran el movimiento vertical de la superficie libre, generadas por el viento, cuya fuerza restauradora es la gravedad y con períodos comprendidos entre 1 y 30 segundos.

El oleaje es generado por la acción del viento. Una vez fuera de la zona de generación, se propaga disipando muy poca energía hasta alcanzar la costa. Allí disipa su energía debido a la interacción con el fondo y a los procesos de rotura. Presenta un aspecto distinto según se encuentre en la zona de generación o fuera de ella. En la zona de generación, su aspecto es caótico, con crestas cortas y asimétricas, se observan roturas y las direcciones de propagación varían en un amplio sector alrededor de la dirección del viento generador. A este tipo de oleaje se lo conoce como oleaje local u oleaje tipo *Sea* y se dice que está totalmente desarrollado si se encuentra en equilibrio con el viento generador. Es decir, la energía aportada por el viento es completamente disipada en procesos de rotura e interacción entre ondas, alcanzando un estado de máxima energía. Si por el contrario no alcanza dicho máximo y continúa en crecimiento, se lo denomina oleaje parcialmente desarrollado.

Fuera de la zona de generación, las olas se dispersan debido a diferencias en la dirección de propagación (dispersión angular) o bien por diferencias en la celeridad de las olas (dispersión

radial). Por lo tanto, en la zona de propagación, el oleaje abandona su aspecto caótico, presenta una forma más regular, con olas de crestas largas y mayor período. A este tipo de oleaje se lo conoce como mar de fondo u oleaje tipo *Swell*.

2.1.2 Modelo aleatorio en amplitud y fase

En el apartado anterior se mencionó que los períodos de las ondas que conforman el oleaje se encuentran entre 1 y 30 segundos, y las longitudes de onda se encuentran entre 0,1 y 1500 m dependiendo de la profundidad. Si bien una descripción detallada de la evolución de una ola requeriría emplear escalas espaciales y temporales de ese orden o menor, para la descripción de las variaciones en espacio y tiempo del oleaje con fines ingenieriles se utilizan escalas mayores. Estas escalas están asociadas a los procesos de generación, propagación y disipación, y responden esencialmente a las escalas típicas del campo de viento generador y de la batimetría.

La utilización de escalas mayores que las propias de las ondas que lo conforman, hace que para la descripción del oleaje se recurra a métodos estadísticos. Por lo tanto, un estado de mar, entendiéndolo como el oleaje que tiene lugar en una determinada región espacial durante un determinado intervalo de tiempo, es descrito en términos estadísticos.

El enfoque utilizado a partir del trabajo de Pierson, Newmann y James (1955) se basa en considerar las variaciones de la superficie libre del mar debidas al oleaje, como un proceso ergódico gaussiano. La ergodicidad es una condición razonable en la medida que tanto el intervalo de tiempo como la región para la cual se define el estado de mar no sean extensos y que por lo tanto el oleaje sea estadísticamente estacionario y homogéneo en el espacio. Intervalos de tiempo de 1 hr y dimensiones espaciales de 10-100 km para el océano, 1-10km para la plataforma continental y 100m-1km para la zona costera son valores aceptados para definir un estado de mar. Por su parte, la gaussianidad del proceso se justifica a partir del teorema central del límite, considerando la variación de la superficie libre como la superposición de trenes de ondas con distinta frecuencia y dirección, independientes entre sí y cuyas amplitudes y fases son variables aleatorias. Las limitaciones al considerar las variaciones de la superficie libre del mar como un proceso gaussiano se presentan cuando las interacciones entre los trenes de ondas son significativas, tal es el caso de aguas con poca profundidad o cuando el oleaje es muy peraltado².

La representación de las variaciones de la superficie libre a partir de la superposición de trenes de ondas con distinta frecuencia y dirección, independientes entre sí y cuyas amplitudes y fases son variables aleatorias, se conoce como modelo aleatorio en amplitud y fase y se sintetiza en la siguiente expresión:

$$\eta^*(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a^*_{i,j} \cos(w_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i x \sin \theta_j + \alpha^*_{i,j}) . \quad [2.1]$$

Donde η es la cota de la superficie libre respecto a su nivel medio, mientras que a , w , k , θ y α son la amplitud, frecuencia, número de onda, dirección y fase de cada armónico respectivamente. El subíndice i hace referencia a los armónicos cuya frecuencia y número de onda (vinculados entre sí por la ecuación de dispersión. Ver 2.30) son w_i y k_i respectivamente.

² El peralte de una ola es el cociente entre su altura y longitud de onda, H/L

Por su parte, el subíndice j hace referencia a los armónicos cuya dirección de propagación es θ_j . El supraíndice $*$ significa que la variable es aleatoria y se describe mediante una función de distribución de probabilidad. En el caso de $a^*_{i,j}$, la fase del armónico correspondiente a la frecuencia w_i y a la dirección θ_j , se describe mediante una distribución de probabilidad uniforme entre 0 y 2π (ecuación 2.2), mientras que $a^*_{i,j}$ se describe mediante una función de distribución de probabilidad del tipo Rayleigh (ecuación 2.3).

$$p(\alpha_{i,j}) = \frac{1}{2\pi} \text{ para } 0 < \alpha_{i,j} \leq 2\pi \quad [2.2]$$

$$p(a_{i,j}) = \frac{\pi}{2} \frac{a_{i,j}}{\mu_{i,j}^2} \exp\left(-\frac{\pi a_{i,j}^2}{4\mu_{i,j}^2}\right) \text{ para } 0 \leq a_{i,j} \quad [2.3]$$

Donde $\mu_{i,j}$ es el valor esperado de $a_{i,j}$ ($\mu_{i,j} = E(a^*_{i,j})$).

Las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 constituyen el modelo aleatorio en amplitud y fase, mediante el cual se describe un estado de mar en el cual la variación de la superficie libre responde a una distribución gaussiana de valor esperado 0 y desviación estándar $\sqrt{m_o}$ (ecuación 2.4).

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_o}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2m_o}\right) \quad [2.4]$$

2.1.3 Espectro

La función que al par $\{w_i, \theta_j\}$ le atribuye $\mu_{i,j} = E(a^*_{i,j})$ se la conoce como espectro de amplitudes. Al ser $\mu_{i,j}$ los únicos parámetros del modelo aleatorio en amplitud y fase, el espectro de amplitudes constituye una descripción estadística completa de un estado de mar. Esta descripción es precisa en la medida que la variación de la superficie libre del mar se corresponda con un proceso gaussiano.

Al igual que el espectro de amplitudes, se define el espectro de varianza como:

$$\{w_i, \theta_j\} \rightarrow E\left(\frac{1}{2} a^*{}^2_{i,j}\right). \quad [2.5]$$

La virtud del espectro de varianza radica en que, considerando el modelo aleatorio en amplitud y fase, la varianza de la superficie libre es igual a la sumatoria de la varianza de los armónicos,

$$E(\eta^{*2}) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M E\left(\frac{1}{2} a^*{}^2_{i,j}\right) = m_o \quad [2.6]$$

Considerando que en la naturaleza las frecuencias y direcciones no se presentan en forma discreta sino que se tiene un continuo de frecuencias y direcciones, se define el espectro de densidad de varianza como:

$$S(f, \theta) = \lim_{\Delta f, \Delta \theta \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta f \Delta \theta} E\left(\frac{1}{2} a^*{}^2\right) \right] \quad \text{Siendo } f = w/2\pi \quad [2.7]$$

Por lo tanto, el espectro de densidad de varianza también constituye una descripción estadística completa del estado de mar y permite visualizar como se distribuye en el dominio de las frecuencias y direcciones la varianza de la superficie libre del mar. En lo que sigue, al

espectro de densidad de varianza se lo denominará espectro del oleaje. En la Figura 2 se muestra uno de los espectros obtenidos en este trabajo a partir de modelación numérica.

De las ecuaciones 2.6 y 2.7 se desprende que,

$$m_0 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) df d\theta \quad [2.8]$$

A m_0 se lo denomina momento de orden 0 del espectro. Análogamente se puede definir el momento de orden i de la siguiente forma:

$$m_i = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^i \cdot S(f, \theta) df d\theta \quad [2.9]$$

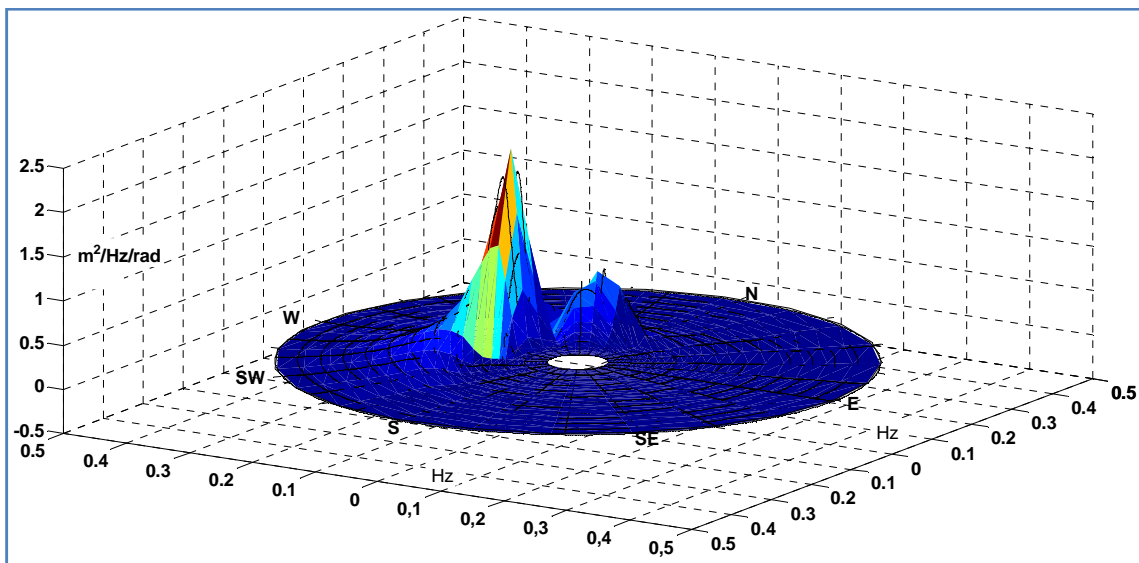


Figura 2.- Espectro del oleaje obtenido en este trabajo a partir de modelación. La dirección hace referencia hacia donde se dirige el oleaje, mientras que en el eje radial corresponde a la frecuencia.

2.1.4 Parámetros descriptores

Si bien el espectro del oleaje constituye una descripción completa de un estado de mar, en general se utiliza un conjunto más acotado de parámetros que permiten sintetizar su descripción. Estos parámetros pueden ser obtenidos a partir del propio espectro o bien a partir de un registro temporal de la cota de la superficie libre como el que se muestra en la Figura 3.

Describir el oleaje partiendo de un registro temporal de la superficie libre, requiere en una primera instancia, identificar olas individuales. Uno de los métodos que se utiliza es el de "paso descendente por cero". Este método se ejemplifica en la Figura 3 y consiste en definir una ola entre dos pasos sucesivos por cero, cuando la cota de la superficie libre se encuentra decreciendo. Por lo tanto, el período de la ola (T_i) queda definido por la diferencia de tiempo entre estos dos pasos descendientes por cero, mientras que la altura de la ola (H_i) queda definida por la diferencia entre el máximo y mínimo absoluto del registro de la superficie libre en dicho período. De esta forma, a partir de un registro temporal de la cota de la superficie libre se obtiene un registro de olas (H_i, T_i).

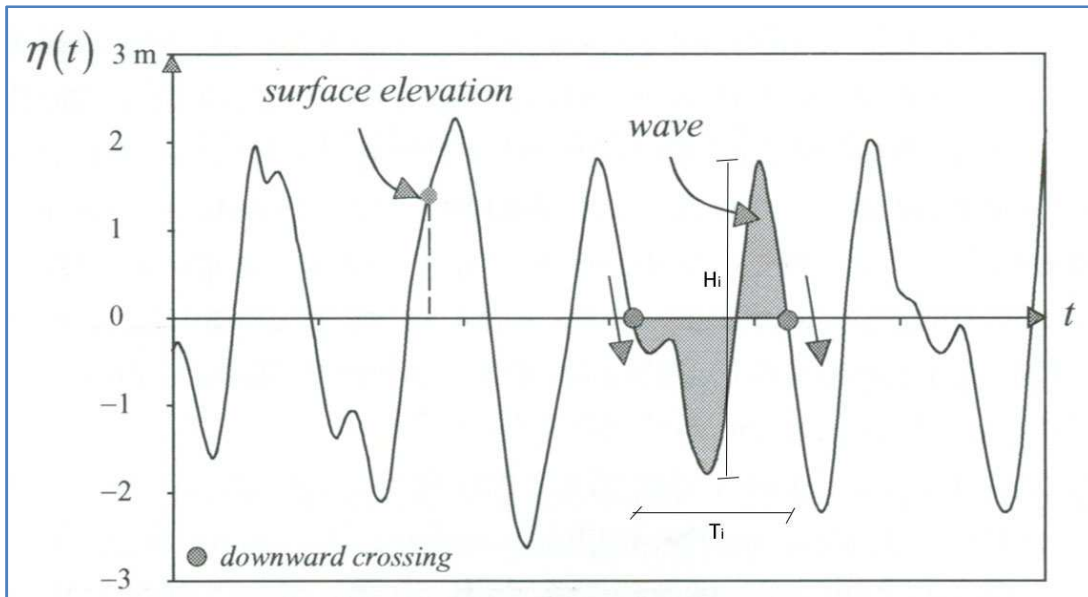


Figura 3.- Registro temporal de la cota de la superficie libre del mar ($\eta(t)$). Ejemplo de obtención de olas mediante el método del paso descendente por cero. Tomado de Holthuijsen (2007)

Los parámetros comúnmente utilizados para caracterizar las alturas de ola de un estado de mar son: la altura de ola media (\bar{H}), la altura de ola cuadrática media (H_{rms}) y la altura de ola significativa (H_s). Esta última se calcula ordenando el registro de mayor a menor y promediando el tercio superior. De ahí que también se la denomina $H_{1/3}$. Si a partir del registro se obtuvieron N olas, los parámetros mencionados se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i, \quad H_{rms} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)^{1/2}, \quad H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j = H_{1/3} \quad [2.10]$$

La experiencia muestra que las alturas de ola de un estado de mar presentan una distribución de probabilidad del tipo Rayleigh,

$$p(H) = \frac{4H}{H_s^2} \exp \left[-2 \left(\frac{H}{H_s} \right)^2 \right]. \quad [2.11]$$

Este resultado también se alcanza de forma teórica, considerando las variaciones de la superficie libre del mar como un proceso ergódico gaussiano y considerando un espectro de oleaje angosto⁴. Bajo estas hipótesis, la altura de ola H_{m0} , definida a partir del momento de orden 0 del espectro del oleaje (ecuación 2.12), es igual a la altura de ola significativa (H_s).

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad [2.12]$$

³ El subíndice j hace referencia al tercio superior de la serie, mientras que el subíndice i hace referencia a toda la serie.

⁴ La varianza de la superficie libre del mar se encuentra concentrada en torno a una frecuencia. Por el contrario un espectro ancho es aquel en que la varianza se presenta dispersa en un amplio rango de frecuencias.

En general H_{m0} se la considera como la estimación a partir del espectro del oleaje de la altura de ola significativa. A partir de H_{m0} y considerando la distribución Rayleigh, se pueden estimar el resto de los parámetros que caracterizan la altura de ola de la siguiente forma:

$$\bar{H} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} H_{m0} \quad H_{rms} = \frac{1}{2} \sqrt{2} H_{m0} \quad [2.13]$$

En cuanto al período, los parámetros que comúnmente se utilizan son el período medio (T_z) y el período significativo ($T_{1/3}$). Los mismos se calculan de la siguiente forma:

$$T_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^N T_j \quad [2.14]$$

Rice (1944,1945,1954) demostró que para un proceso ergódico gaussiano el período medio es igual al período T_{m02} . El cual se define a partir del espectro de la siguiente manera:

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad [2.15]$$

Otros períodos que se definen a partir del espectro del oleaje y que se utilizan para caracterizarlo son:

$$T_{m01} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{y} \quad T_E = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad [2.16]$$

El período T_{m01} es el inverso de la frecuencia media y es menos sensible al ruido de las altas frecuencias que T_{m02} . El período T_E se lo denomina período de energía pues permite calcular junto a H_s la potencia del oleaje en aguas profundas. Tanto T_{m01} como T_{m02} y T_E caracterizan el período medio de un estado de mar. Además de los mismos, es de interés el período pico (T_p) y la anchura espectral (ν). El primero, se define como el inverso de la frecuencia en la que tiene lugar el máximo valor del espectro del oleaje, mientras que para el segundo existen diferentes propuestas, siendo una de ellas la de Longuet Higgins (1975),

$$\nu = \left(\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right)^{1/2} \quad [2.17]$$

En cuanto a la dirección, se define dirección media θ_m como:

$$\theta_m = \text{atan} \left[\frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{sen}(\theta) S(f, \theta) df d\theta}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{cos}(\theta) S(f, \theta) df d\theta} \right] \quad [2.18]$$

Análogamente al período, se define la dirección pico (θ_p) y la dispersión angular respecto a θ_m (σ_θ). Para este último parámetros existen diversas propuestas para estimarlo, siendo una de ellas la propuesta por Kuik et.al. (1988),

$$\sigma_\theta = \left[2 \left\{ 1 - \left(\frac{\left(\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{sen}(\theta) S(f, \theta) df d\theta \right)^2 + \left(\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \text{cos}(\theta) S(f, \theta) df d\theta \right)^2}{m_0^2} \right)^{1/2} \right\} \right]^{1/2} \quad [2.19]$$

2.1.5 Teoría lineal

La teoría lineal del oleaje brinda el marco teórico necesario para explicar y describir los armónicos introducidos por el modelo aleatorio en amplitud y fase. Debido al carácter lineal de la teoría, los armónicos resultantes se propagan sin afectarse entre ellos y el efecto sobre la superficie libre puede obtenerse a partir de la superposición de los mismos.

La teoría lineal también se la conoce como teoría de pequeña amplitud. Esto se debe a que los términos lineales del problema son los que predominan si la amplitud de la ola es pequeña respecto a su longitud de onda y respecto a la profundidad. En el caso de una ola peraltada o propagándose en aguas poco profundas, las no linealidades adquieren relevancia como para poder ser desestimadas.

La teoría se basa en considerar el movimiento irrotacional de un fluido incompresible. La irrotacionalidad se justifica pues los esfuerzos de corte son significativos solamente en la capa límite que ocupa un pequeño espesor próximo al fondo. Por lo tanto, la velocidad proviene de un potencial $\phi(x, y, z, t)$ (ecuación 2.20a) que se considera una de las incógnitas del problema. Este potencial, por la hipótesis de incompresibilidad, verifica la ecuación de Laplace (ecuación 2.20b) y la ecuación de Bernoulli para movimientos irrotacionales (ecuación 2.20c). Se le imponen condiciones de periodicidad en espacio y tiempo (ecuación 2.21) ya que se busca el potencial del campo de velocidades de una onda. El planteo del problema se cierra fijando condiciones de borde en el fondo y en la superficie libre. En el fondo, la condición de borde es cinemática y consiste en considerar que el fluido no atraviesa ni abandona el fondo (ecuación 2.22). Mientras que las condiciones de borde en la superficie libre consisten en considerar que la misma es una superficie material (condición de borde cinemática que se expresa mediante la ecuación 2.23), donde la presión es la presión atmosférica (condición de borde dinámica que se expresa mediante la ecuación 2.24). Por lo tanto, la cota de la superficie libre $\eta(x, t)$ constituye otra incógnita del problema.

$$\vec{v} = \nabla\phi \quad (a), \quad \Delta\phi = 0 \quad (b), \quad \frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad (c) \quad [2.20]$$

$$\phi(x, z, t) = \phi(x + L, z, t), \quad \phi(x, z, t) = \phi(x, z, t + T) \quad ^5 \quad [2.21]$$

$$\left. \frac{\partial\phi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0 \quad (\text{Simplificación para fondo plano}) \quad [2.22]$$

$$\left(\frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\phi}{\partial x} \frac{\partial\eta}{\partial x} = \frac{\partial\phi}{\partial z} \right) \Big|_{z=\eta(x,t)} \quad [2.23]$$

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial\phi^2}{\partial x} + \frac{\partial\phi^2}{\partial z} \right] + g\eta = C(t) \right) \Big|_{z=\eta(x,t)} \quad [2.24]$$

Las no linealidades del problema se deben a las condiciones de borde en la superficie libre (ecuaciones 2.23 y 2.24). Una forma de linealizarlo consiste en aplicar un desarrollo de Taylor a las mismas en $z=0$ y mantener únicamente el primer término del desarrollo. Los términos que se dejan de lado son de menor orden siempre que los desplazamientos de la superficie libre sean pequeños frente a la profundidad y a la longitud de onda. De esta forma se obtiene el sistema de ecuaciones 2.25.

⁵ Al potencial se lo considera bidimensional ($\phi(x, z, t)$) a los efectos de simplificar la notación.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\phi = 0 \\ \phi(x, z, t) = \phi(x + L, z, t), \quad \phi(x, z, t) = \phi(x, z, t + T) \\ \left(\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \Big|_{z=0} \\ \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right) \Big|_{z=0} \\ \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \right) \Big|_{z=-h} \end{array} \right. \quad [2.25]$$

La expresión de $\eta(x, t)$ que se presenta en la ecuación 2.26 y la expresión del potencial de velocidades que se presenta en la ecuación 2.27 son solución del sistema de ecuaciones 2.25. Esta solución corresponde a una onda progresiva de amplitud a , período T , frecuencia angular $\omega = \frac{2\pi}{T}$, longitud de onda L y número de onda $k = \frac{2\pi}{L}$ como la que se muestra en la Figura 4

$$\eta(x, t) = a \cdot \text{sen}(\omega t - kx) \quad [2.26]$$

$$\phi(x, z, t) = \frac{\omega a \cosh[k(h+z)]}{k \sinh(kh)} \cos(\omega t - kx) \quad [2.27]$$

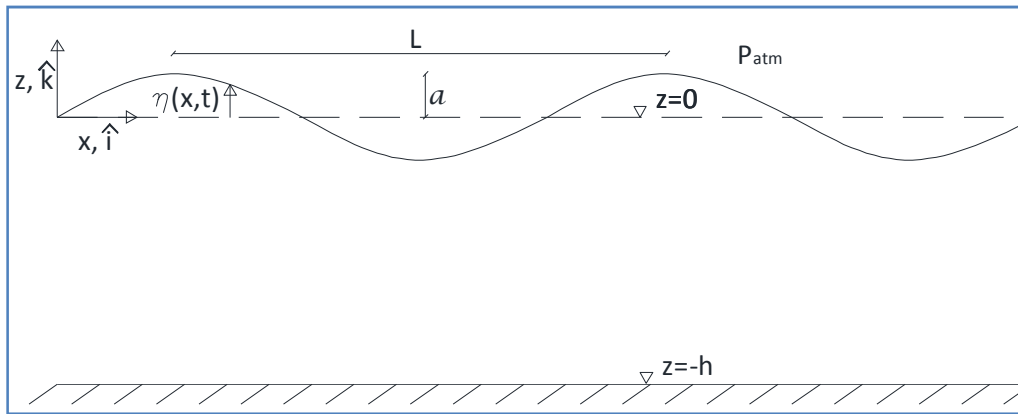


Figura 4.- Esquema de una onda progresiva solución de la teoría lineal del oleaje

Con ϕ y η determinados, aplicando 2.20a y 2.20c se obtiene una expresión para el campo de velocidades (2.28) y el campo de presiones (2.29).

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{v} = u \cdot \hat{i} + w \cdot \hat{k}, \\ u(x, z, t) = \omega a \cdot \frac{\cosh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \text{sen}(\omega t - kx) \\ w(x, z, t) = \omega a \cdot \frac{\sinh[k(h+z)]}{\sinh(kh)} \cos(\omega t - kx) \end{array} \right. \quad [2.28]$$

$$p(x, z, t) = -\rho g z + \rho g a \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(\omega t - kx) = -\rho g z + p_{ola} \quad [2.29]$$

Otro resultado que se obtiene a partir del sistema de ecuaciones 2.25 es la ecuación de dispersión (2.30) que relaciona la frecuencia (ω) con el número de onda (k). A partir de la misma, se desprende la expresión 2.31 que relaciona la celeridad de la onda $c = \frac{\omega}{k}$ con la profundidad, frecuencia y el número de onda.

$$\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad [2.30]$$

$$c = \frac{g}{\omega} \cdot \tanh(kh) \quad [2.31]$$

2.1.6 Energía

La energía en las olas se presenta en forma de energía potencial, asociada a la elevación de la superficie libre respecto a su nivel de reposo, y en términos de energía cinética, pues las partículas de fluido por el que se propaga un tren de ondas se encuentran en continuo movimiento. Considerando un volumen de control prismático, limitado inferiormente por el fondo ($z=-h$) y superiormente por la superficie libre ($z= \eta$), la energía potencial por unidad de área horizontal y promediada en un período se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{pot} = \overline{\int_{-h}^{\eta} \rho g z. dz} - \overline{\int_{-h}^0 \rho g z. dz} = \overline{\int_0^{\eta} \rho g z. dz} \quad [2.32]$$

El segundo término de 2.32 es la energía potencial en el caso del fluido en reposo, por lo que la resta corresponde a la energía potencial por unidad de área horizontal, promediada en un período e inducida por el oleaje. En el caso de la onda progresiva obtenida a partir de la teoría lineal, en donde η queda representado por la expresión sinusoidal 2.26, se obtiene que la energía potencial por unidad de área y promediada en un período vale:

$$E_{pot} = \overline{\frac{1}{2} \rho g \eta^2} = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad [2.33]$$

Análogamente, la energía cinética por unidad de área horizontal y promediada en un período se calcula mediante la siguiente expresión:

$$E_{cinética} = \overline{\int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho v^2. dz} = \overline{\int_{-h}^0 \frac{1}{2} \rho v^2. dz} + \overline{\int_0^{\eta} \frac{1}{2} \rho v^2 z. dz} \quad [2.34]$$

Considerando el campo de velocidades obtenido a partir de la teoría lineal (2.28), se observa que el segundo término de la expresión 2.34 es un orden de magnitud menor que el primero. Por lo tanto, la energía cinética por unidad de área y promediada en un período la podemos aproximar por:

$$E_{cinética} \approx \overline{\int_{-h}^0 \frac{1}{2} \rho v^2. dz} = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad [2.35]$$

Sumando la energía potencial y la energía cinética se obtiene que la energía mecánica inducida por el oleaje, promediada en un período y por unidad de área horizontal vale:

$$E = E_{potencial} + E_{cinética} = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad [2.36]$$

Combinando las expresiones 2.36 y 2.7, se define el espectro de energía del oleaje como:

$$S_{energía}(f, \theta) = \rho g S(f, \theta) \quad [2.37]$$

El espectro de energía del oleaje muestra como se distribuye, en el dominio de las frecuencias y direcciones, la energía de un estado de mar. Siendo la energía promedio de un estado de mar:

$$E = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S_{energía}(f, \theta). df d\theta = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta). df d\theta = \rho g m_0 \quad [2.38]$$

⁶ La barra horizontal superior indica que se trata de un promedio temporal en un período

Además de la energía del oleaje, es de interés la velocidad a la cual se transporta la misma. Para ello, se calcula para la ola sinusoidal, el flujo de energía (F) a través de una sección vertical perpendicular a la dirección de propagación y de ancho unitario. El cálculo se realiza sumando los promedios en un período del flujo de energía cinética, el flujo de energía potencial y la potencia de la presión.

$$F = \overline{\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) u dz} + \overline{\int_{-h}^{\eta} (\rho g z) u dz} + \overline{\int_{-h}^{\eta} (-\rho g z + p_{ola}) u dz} \quad [2.39]$$

Se observa que la potencia de la componente hidrostática de la presión se anula con el flujo de energía potencial y el flujo de energía queda:

$$F = \overline{\int_{-h}^{\eta} \left(\frac{1}{2} \rho v^2\right) u dz} + \overline{\int_{-h}^0 (p_{ola}) u dz} + \overline{\int_0^{\eta} (p_{ola}) u dz} \quad [2.40]$$

Recurriendo al campo de velocidades y presiones obtenidos a partir de la teoría lineal (2.28 y 2.29), se obtiene que el primer y tercer sumando del miembro derecho de 2.40 son un orden menor que el segundo término. Por lo tanto el flujo de energía por unidad de ancho se aproxima por este último,

$$F \approx \overline{\int_{-h}^0 (p_{ola}) u dz} = \left(\frac{1}{2} \rho g a^2\right) \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \frac{w}{k}\right] \quad [2.41]$$

Se observa que el flujo de energía por unidad de ancho es igual a la energía de la ola (2.38) por una velocidad denominada velocidad de grupo (C_g),

$$F = E C_g, \text{ siendo } E = \frac{1}{2} \rho g a^2 \text{ y } C_g = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \frac{w}{k} \quad [2.42]$$

La velocidad de grupo se interpreta como la velocidad a la que se propaga la energía del oleaje. Derivando la ecuación de dispersión (2.30) se observa que la misma verifica:

$$C_g = \frac{\partial w}{\partial k} \quad [2.43]$$

En base al flujo de energía calculado para la ola sinusoidal obtenida con la teoría lineal, se calcula la potencia de un estado de mar como:

$$Pot = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S_{energía}(f, \theta) \cdot C_g(f) df d\theta = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot C_g(f) df d\theta \quad [2.44]$$

A partir de 2.30 y 2.42, tomando el límite $kh \rightarrow \infty$ se obtiene que la velocidad de grupo en aguas profundas vale:

$$C_g \Big|_{kh \rightarrow \infty} = \frac{g}{2w} = \frac{g}{4\pi f} \quad [2.45]$$

Sustituyendo 2.45 en 2.44 y considerando las definiciones del período de energía (2.16) y altura de ola H_{mo} (2.12), se obtiene que la potencia del oleaje en aguas profundas puede ser calculada como:

$$\left\{ \begin{array}{l} Pot = \rho g \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot \frac{g}{4\pi f} df d\theta = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cdot f^{-1} df d\theta \\ Pot = \frac{\rho g^2}{4\pi} T_E m_0 \\ Pot = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_E H_{m0}^2 \end{array} \right. \quad [2.46]$$

Cuando no sé dispone del espectro de un estado de mar pero se conocen algunos parámetros descriptores y entre ellos la altura de ola H_{m0} y el período de energía T_E , por más que no valga estrictamente la condición de aguas profundas, la potencia del oleaje se suele estimar a partir de la expresión 2.46, en lo que se denomina aproximación para aguas profundas. Crabb (1984) reportó una subestimación del 12 % debido a la aproximación para aguas profundas en un sitio con 45 m de profundidad de la costa de Escocia.

Cuando el período de energía (T_E) no se conoce pero si se conoce el período medio o el período pico, es necesario realizar alguna consideración adicional para estimar la potencia del oleaje a partir de 2.46. Una relación entre T_E y T_z se puede obtener a partir de considerar un espectro teórico. El espectro de un oleaje totalmente desarrollado en aguas profundas se ajusta razonablemente bien al espectro teórico de Pierson-Moscowitz (Ver 2.50). La relación entre T_E y T_z que se obtiene a partir del espectro de Pierson- Moskowitz es $T_E = 1.20T_z$, mientras que entre T_E y T_p es $T_E = 0.86T_p$. De esta forma, la potencia del oleaje se puede estimar a partir del período medio o el período pico como se muestra en 2.47, en lo que se denomina aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado.

$$Pot = 1.20 \frac{\rho g^2}{64\pi} T_z H_{m0}^2, \quad Pot = 0.86 \frac{\rho g^2}{64\pi} T_p H_{m0}^2 \quad [2.47]$$

En lo que sigue, cuando se dispuso del espectro, como en el caso de las salidas del modelo en las boyas virtuales, la potencia del oleaje se calculó mediante la expresión 2.44. Mientras que cuando no se disponía del espectro, como fue el caso de los datos satelitales altimétricos y las series de medidas in-situ utilizadas, se recurrió para el cálculo de la potencia del oleaje a la aproximación para aguas profundas (2.46) o a la aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado(2.47) según si se conocía o no T_E .

2.2 Modelación del oleaje

2.2.1 Tipos de modelos

Existen distintos tipos de modelos que permiten estimar el oleaje partiendo fundamentalmente de información del viento responsable de la generación. Montoya y Osorio (2007) clasificaron estos modelos en empíricos, de base física y heurísticos.

Los modelos empíricos fueron la primera técnica empleada para el pronóstico del oleaje. Comenzaron a desarrollarse y aplicarse durante la segunda guerra mundial. Los mismos establecen una relación entre los parámetros del oleaje y, la velocidad del viento en la superficie (U_{10}), la distancia sobre la cual actúa el viento (*fetch*, F), la duración de la tormenta (d) y la profundidad del cuerpo de agua (h). La velocidad del viento y la profundidad son consideradas por un único valor solamente, de ahí que Holthuijsen (2007) los denomina "modelos para condiciones idealizadas", pues constituyen la estimación del oleaje generado por un viento estacionario y uniforme que actúa sobre un cuerpo de agua de profundidad constante, cuya línea de costa a barlovento es perpendicular a la dirección del viento. Bajo estas condiciones ideales, es razonable admitir que el oleaje dependa únicamente de U , F , d , h y g ⁷. De esta forma, aplicando análisis dimensional y utilizando datos medidos en campo bajo condiciones que se aproximan a las condiciones ideales mencionadas, se obtienen las expresiones que constituyen los modelos empíricos.

En el caso de un oleaje totalmente desarrollado en aguas profundas, no existe la dependencia con el *fetch*, ni con la duración de la tormenta, ni con la profundidad y por lo tanto el oleaje solo depende de U y g . Pierson y Moskowitz (1964), a partir de una campaña de medición en el océano Atlántico Norte encontraron que la altura de ola significativa adimensionada (2.48) y el período pico adimensionado (2.49) de un oleaje totalmente desarrollado en aguas profundas verifican:

$$\tilde{H}_s = \frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.24 \quad [2.48]$$

$$\tilde{T}_p = \frac{gT_p}{U_{10}} = 7.69 \quad [2.49]$$

A su vez, obtuvieron una expresión para el espectro de frecuencias del oleaje totalmente desarrollado denominado espectro de Pierson-Moskowitz y cuya expresión es:

$$E_{PM}(f) = \alpha_{PM} g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_{PM}} \right)^{-4} \right] \quad [2.50]$$

Donde $\alpha_{PM}=0.0081$ y f_{PM} es la frecuencia pico del espectro que se obtiene de 2.49

Las expresiones 2.48 y 2.49 fueron extendidas para oleaje en desarrollo en aguas profundas en lo que se denominó el método SMB (Sverdrup-Munk-Bertchneider, 1946, 47, 52). Este método fue modificado por Kahma y Calkoen (1992) y luego por Young y Verghagen (1996) quienes a partir de mediciones en el lago George, Australia, lo extendieron a profundidades arbitrarias.

⁷ Aceleración gravitatoria

La expresiones propuestas por Young y Verhagen modificadas por Breugem y Holthuisjen (2006) son:

$$\tilde{H}_s = \tilde{H}_{s\infty} \left[\tanh(k_3 \tilde{h}^{m_3}) \tanh \left(\frac{k_1 \tilde{F}^{m_1}}{\tanh(k_3 \tilde{h}^{m_3})} \right) \right]^p \quad [2.51]$$

$$\tilde{T}_p = \tilde{T}_{p\infty} \left[\tanh(k_4 \tilde{h}^{m_4}) \tanh \left(\frac{k_2 \tilde{F}^{m_2}}{\tanh(k_4 \tilde{h}^{m_4})} \right) \right]^q \quad [2.52]$$

Donde \tilde{H}_s , \tilde{T}_p , \tilde{F} y \tilde{h} son la altura de ola significativa adimensionada, el período pico adimensionado, el *fetch* equivalente adimensionado (2.53) y la profundidad adimensionada (2.54) respectivamente. Mientras que $\tilde{H}_{s\infty}$ y $\tilde{T}_{p\infty}$ son los valores correspondientes a aguas profundas (2.48 y 2.49).

$$\tilde{F} = \frac{gF_{eq}}{U_{10}^2} \quad [2.53]$$

$$\tilde{h} = \frac{gh_{eq}}{U_{10}^2} \quad [2.54]$$

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros que aparecen en las expresiones 2.51 y 2.52.

Tabla 1.- Valores de los parámetros de las expresiones propuestas por Young y Verhaghen (1996) y modificadas por Breugem y Holthuisjen(2006) para estimar la altura de ola significativa y el período pico ([4] y [5]).

\tilde{H}_s	p	m₁	m₃	k₁	k₃
	0.572	0.79	1.14	4.41×10^{-4}	0.343
\tilde{T}_p	q	m₂	m₄	k₂	k₄
	0.187	1.45	2.01	2.77×10^{-7}	0.1

En lo que respecta al espectro, Hasselmann et.al. (1973) propusieron un espectro de frecuencias a partir de los datos obtenidos en el marco del proyecto JONSWAP⁸. Este espectro ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones ingenieriles para representar un oleaje en desarrollo en aguas profundas. Su utilización se debe a que representa adecuadamente el oleaje en condiciones de tormenta. Bajo estas condiciones, se entiende que las interacciones no lineales entre grupos de cuatro olas (cuadrupletes) son las responsables de que el espectro se establezca en la forma del espectro JONSWAP. La expresión del mismo se obtiene multiplicando el espectro de Pierson-Moskowitz por una función de forma que acrecienta el pico. De esta forma se obtiene:

$$E_{JONSWAP}(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f/f_p - 1}{\sigma} \right)^2 \right] \quad [2.55]$$

Los parámetros α y f_p , herencia del espectro de Pierson-Moskowitz, dependen del estado de desarrollo del oleaje de forma consistente con 2.51 y 2.52. Por su parte, los parámetros involucrados en la función de forma (γ y σ) también depende del estado de desarrollo del

⁸ Joint North Sea Wave Project

oleaje pero debido a la gran dispersión obtenida en los datos, se suelen utilizar sus valores medios: $\gamma = 3.3$, $\sigma_a = 0.07$ y $\sigma_b = 0.09$. Siendo $\sigma = \sigma_a$ si $f < f_p$ o $\sigma = \sigma_b$ si $f \geq f_p$

En aguas poco profundas la interacción del fondo modifica la forma del espectro. Bouws et.al. (1985), considerando la profundidad del cuerpo de agua donde se desarrolla el oleaje, propusieron una generalización del espectro JONSWAP denominado espectro TMA cuya expresión es:

$$E_{TMA}(f) = E_{JONSWAP}(f) \frac{(\tanh(kh))^2}{\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right)} \quad [2.56]$$

A modo de ejemplo, en la Figura 5 se presentan superpuestos, un espectro del tipo Pierson-Moskowitz para un viento intenso de 20 m/s, un espectro JONSWAP para el mismo viento y una distancia de *fetch* de 100 Km, y un espectro TMA para el mismo viento y *fetch*, y una profundidad de 20 metros.

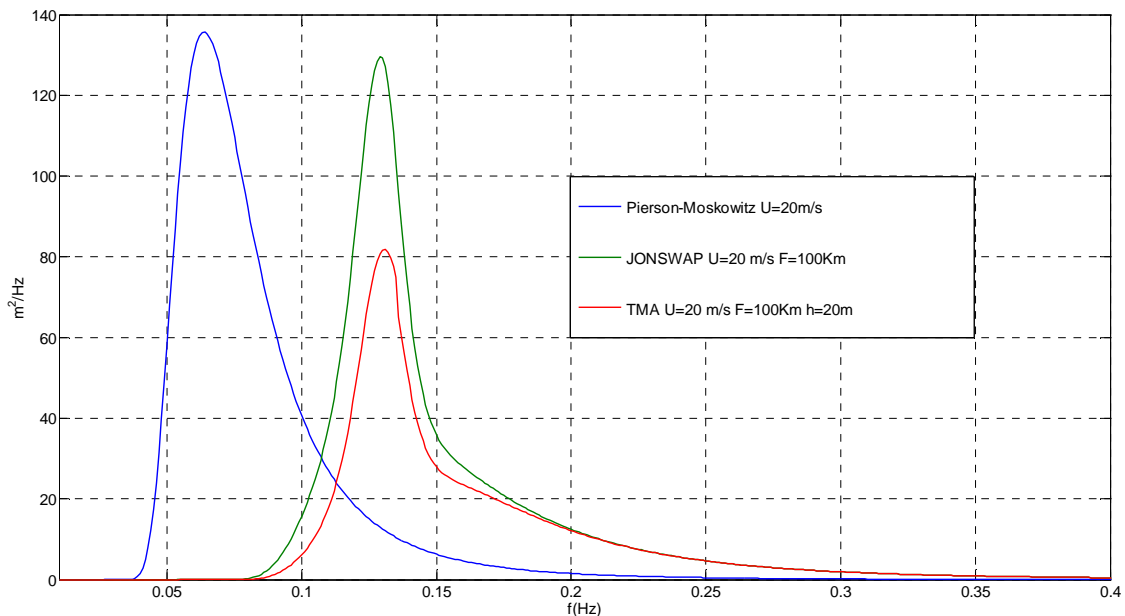


Figura 5.-Espectro de Pierson-Moskowitz para U=20m/s; Espectro JONSWAP para U=20m/s y F=100Km y Espectro TMA para U=20m/s, F=100Km y h=20m.

La obtención de espectros teóricos bidimensionales reviste una mayor dificultad debido a la carencia de información direccional. Para su obtención se define la función de dispersión direccional ($D(f,\theta)$) y la dispersión direccional ($\sigma(f)$) de la siguiente forma:

$$E(f, \theta) = E(f) \cdot D(f, \theta); \quad \sigma(f)^2 = \int_{-\pi}^{\pi} \left[2 \operatorname{sen} \left(\frac{1}{2} \theta \right) \right]^2 D(f, \theta) d\theta. \quad [2.57]$$

Existen algunas expresiones que representan la dependencia de la dispersión direccional con la frecuencia, pero todas presentan una gran dispersión de los datos en torno a las mismas. Como una primera aproximación se suele considerar una dispersión angular de 30° . Por su parte, para la distribución direccional, el modelo más simple y consistente con $\sigma = 30^\circ$ es el propuesto por Pierson et.al. (1952),

$$D(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta) & \text{Si } |\theta| \leq 90^\circ \\ 0 & \text{Si } |\theta| > 90^\circ \end{cases} \quad [2.58]$$

Donde $\theta = 0$ es la dirección del viento. Existen distintas modificaciones propuestas que sofistican el modelo presentado en 2.58, pero ante la falta de observaciones y sustento teórico se suele utilizar 2.58 por su simplicidad.

Los modelos empíricos, como los hasta aquí descritos, permiten obtener una estimación puntual del oleaje local ante ciertas condiciones idealizadas. Las condiciones reales distan mucho de ser las ideales. El viento que genera el oleaje es cambiante en tiempo y no uniforme en el espacio, la batimetría tampoco es uniforme, la línea de costa es irregular adoptando distintas orientación respecto al viento, y el oleaje local se superpone con mar de fondo generado en zonas distantes. Los modelos de base física brindan la posibilidad de modelar el oleaje bajo estas condiciones arbitrarias. Se basan en resolver, para cada componente del espectro, una ecuación diferencial que gobierna la evolución del mismo. Se considera que cada componente del espectro varía en el espacio y en el tiempo, y por lo tanto en coordenadas de Euler y en un sistema cartesiano se expresa de la siguiente forma:

$$E(f, \theta) = E(f, \theta, x, y, t) \quad [2.59]$$

La ecuación que gobierna la evolución de cada componente del espectro se obtiene a partir de aplicar un balance de energía. En ausencia de corrientes, la variación de la energía de una componente del espectro va a estar dada por los procesos de aporte de energía por parte del viento, procesos de disipación de energía de distinta índole y procesos de transferencia de energía entre frecuencias. De esta forma,

$$\frac{dE(f, \theta, x, y, t)}{dt} = S_t(f, \theta, x, y, t) \quad [2.60]$$

Dónde el término de la izquierda permite modelar la propagación del oleaje mientras que el término S_t , denominado término fuente, engloba todos los procesos que aportan o disipan energía, o la transfieren a otras frecuencias. El primer modelo de estas características fue propuesto por Gelcy et. al. (1957), pero por ese entonces no se contaba con suficiente conocimiento sobre los procesos involucrados en el término S_t como para obtener buenos resultados a partir de este tipo de modelos. Trabajos posteriores como el de Miles (1957) sobre la transferencia de energía del viento a las olas, o el de Hasselmann (1973) sobre la interacción entre olas, entre otros, han permitido que desde hace un tiempo se obtengan muy buenos resultados en la modelación del oleaje en base a los mismos.

En ausencia de procesos que aporten o extraigan energía ($S_t=0$), la ecuación 2.60 establece que la energía de cada tren de onda que conforma el oleaje se conserva ($E(f, \theta)=Cte$). En presencia de una corriente este resultado no es cierto. Esto se debe a que la corriente ejerce un trabajo sobre el oleaje. Sin embargo, Whitham (1965) y Bretherton y Garret (1968) demostraron que la magnitud definida en 2.61 denominada densidad de acción del oleaje es conservativa y su evolución está gobernada por 2.62. A esta ecuación se la conoce como ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje.

$$N(f_r, \theta, x, y, t) = E(f_r, \theta, x, y, t) / f_r \quad [2.61]$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(xN)}{\partial x} + \frac{\partial(yN)}{\partial y} + \frac{\partial(f_r N)}{\partial f_r} + \frac{\partial(\theta N)}{\partial \theta} = S_t(f_r, \theta, x, y, t) / f_r \quad [2.62]$$

Donde f_r es la frecuencia relativa respecto a un marco de referencia solidario a la corriente. La relación entre f_r y el número de onda k sigue siendo la ecuación de dispersión (2.30) mientras que la relación entre f_r y la frecuencia absoluta (f_a) es una relación del tipo efecto Doppler,

$$f_a = f_r + 2\pi \vec{k} \cdot U \quad [2.63]$$

Donde U es la velocidad horizontal de la corriente promediada en la vertical y en el tiempo, y \vec{k} es el vector número de onda cuya dirección y sentido queda definido por la dirección de propagación del oleaje.

Los modelos que resuelven la ecuación de balance de la acción del oleaje se clasifican en modelos de primera, segunda o tercera generación según la estrategia que utilizan para resolver 2.62. Los modelos de primera generación consideran de forma explícita en el término fuente (S_t) solamente el aporte de energía del viento, mientras que la disipación es considerada implícitamente, limitando el crecimiento del oleaje en un nivel de saturación definido. Por su parte las interacciones no lineales no son consideradas o simplemente parametrizadas usando el resultado de Hasselman (1963). Por lo tanto, cada componente espectral, en los modelos de primera generación, evoluciona independientemente de todas las otras. Los modelos de segunda generación introdujeron el término de interacción no lineal de forma explícita, pero este término era calculado asumiendo un espectro JONSWAP aunque el espectro tenga otra forma. Otro tipo de modelos también categorizados como de segunda generación, son los modelos híbridos que modelan el oleaje local mediante la evolución de un espectro JONSWAP mientras que el resto del espectro se lo considera mar de fondo y solamente es propagado. Posteriormente surgen los modelos de tercera generación, los cuales consideran de forma explícita los términos de disipación y de interacción no lineal entre componentes. A su vez este último término es calculado directamente sin asumir ninguna forma preestablecida del espectro. Los modelos de tercera generación más utilizados son el WAM (WAMDI group, 1988) y el WAVEWATCH III (Tolman 1997, 1999a, 2009).

Como se mencionó al inicio, además de los modelos empíricos y de base física están los modelos del tipo heurístico. Entre los mismos se encuentran distintas técnicas que permiten aproximar el comportamiento no lineal de un sistema sin un conocimiento previo de las interrelaciones entre los elementos que lo componen. Este tipo de técnicas comenzaron a aplicarse para la estimación del oleaje a mediados de los noventa. El modelo para pronosticar oleaje en tiempo real en base a la técnica de redes neuronales presentado por Deo y Naidu (1999) o el modelo del tipo Autómata Celular presentado por Wang (2003) son algunos ejemplos. Mahjoobi et.al. (2008) implementaron tres modelos de tipo heurístico para determinar el oleaje en el lago Ontario. Uno de los modelos es en base a redes neuronales (ANN), otro en base a la técnica de Lógica Difusa (*Fuzzy Inference System*, FIS) y un tercero denominado Lógica difusa basado en redes adaptativas (ANFIS) que surge de una combinación

entre los dos primeros. Los parámetros que estimaron fueron la altura de ola significativa y el período pico. Obtuvieron muy buenos resultados con los tres modelos, siendo el ANFIS un poco más preciso que los otros dos. En general obtuvieron más precisión en la determinación de la altura de ola significativa que en la determinación del período pico. Por otra parte, cuanto mayor era la altura de ola menor fue la precisión de los modelos. Finalmente remarcan que para obtener buenos resultados con un modelo de estas características es necesario contar con suficiente información para utilizar en el proceso de aprendizaje del modelo. Esto restringe su aplicación a estimaciones puntuales del oleaje, donde se cuenta con información del viento local, duración de tormentas, distancias de *fetch* y del oleaje en otros puntos. Por lo tanto este tipo de modelos constituyen una buena alternativa para obtener pronósticos puntuales de corto plazo, pero no son apropiados para obtener espectros de oleaje en un amplio dominio durante un largo período de tiempo como se requiere en este trabajo.

Por todo lo expuesto, se entiende que los modelos de base física que resuelven la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje son los más apropiados para modelar el oleaje a lo largo de un extenso período y en un amplio dominio espacial. Sobre todo si se cuenta con la capacidad de cálculo de un clúster informático. Por lo tanto, en este trabajo se recurrió al modelo de oleaje de tercera generación WAVEWATCH III.

A continuación, en el apartado 2.2.2 se profundiza en la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje y en los distintos fenómenos físicos que involucra, mientras que en el apartado 2.2.3 se realiza una descripción del modelo WAVEWATCH III versión 3.14.

2.2.2 Ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje

En la ecuación de balance de la acción del oleaje (2.62), el término de la izquierda corresponde a los procesos involucrados en la propagación, mientras que el término de la derecha involucra a los distintos procesos que aportan o extraen energía de cada componente del espectro. A continuación se profundiza en la presentación de cada uno de estos términos, desglosando el término fuente en: el aporte de energía por el viento (S_{viento}), la disipación de energía debido a distintos procesos (S_{ds}) y las interacciones no-lineales responsables de transferir energía entre componentes (S_{nl}).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{f}_r N)}{\partial f_r} + \frac{\partial(\dot{\theta}N)}{\partial \theta} = \frac{1}{f_r} [S_{viento} + S_{ds} + S_{nl}] \quad [2.64]$$

2.2.2.1 Propagación

En ausencia de procesos que aporten o disipen energía, la acción del oleaje se conserva y la siguiente ecuación gobierna la evolución de cada componente del oleaje:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{f}_r N)}{\partial f_r} + \frac{\partial(\dot{\theta}N)}{\partial \theta} = 0 \quad [2.65]$$

El primer término de 2.65 corresponde a la variación local de la energía, el segundo y tercer término constituyen la divergencia espacial del flujo de energía, siendo \dot{x} e \dot{y} la velocidad de propagación de la energía en la dirección x e y de un sistema cartesiano conveniente. En ausencia de una corriente, equivalen a la componente de la velocidad de grupo en cada dirección, mientras que en presencia de una corriente es necesario sumar a la velocidad de grupo la velocidad de la corriente,

$$(\dot{x}, \dot{y}) = \vec{C}_g + \vec{U} \quad [2.66].$$

Donde \vec{C}_g y \vec{U} son la velocidad de grupo y de la corriente respectivamente. Estos tres primeros términos de 2.65 son capaces de explicar el proceso de asomeramiento del oleaje. Es decir, muestran que si varía la velocidad de propagación, la energía tiene que variar en sentido inverso para garantizar el balance. Esto es lo que le sucede a una ola cuando se aproxima a la costa, su velocidad de grupo disminuye conforme disminuye la profundidad, aumentando la altura de ola para compensar el balance de energía.

Para el cálculo del cuarto término de 2.65 hay que recurrir a la ecuación de tipo efecto Doppler (2.63). Este término permite explicar el fenómeno por el cual, en presencia de una corriente, la energía se desplaza dentro del espectro de frecuencias.

El último término de 2.65 tiene en cuenta el cambio de dirección que puede experimentar cada componente del oleaje a medida que se propaga. Este cambio de dirección está asociado a los procesos de refracción y difracción que experimenta una ola cuando se propaga en un medio donde la profundidad varía (refracción por fondo), cuando se enfrenta con obstáculos que generan fuertes variaciones espaciales de la altura de ola (difracción) o ante la presencia de una corriente (refracción por corriente). La velocidad con que cambia la dirección ($\dot{\theta}$) se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{\theta} = -\frac{c_g}{c} \frac{\partial c}{\partial m} - \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \frac{\vec{k}}{\|\vec{k}\|} + \frac{1}{2(1+\delta_a)} \frac{\partial \delta_a}{\partial m} \quad [2.67]$$

Donde C_g y c son la velocidad de grupo y la celeridad de cada componente, \vec{k} es el vector número de onda, \vec{U} es la corriente, m es una coordenada perpendicular a la dirección de propagación y δ_a es:

$$\delta_a = \frac{\nabla(cC_g)\nabla a}{k^2 c C_g a} \quad [2.68]$$

Siendo a la amplitud de cada componente. De esta forma, el primer término de 2.67 representa el cambio de dirección debido a la refracción por fondo, el segundo término representa el cambio de dirección debido a la refracción por corriente y el último término representa el cambio de dirección debido a la difracción.

Para modelar el oleaje en un dominio de escala oceánica resulta conveniente emplear un sistema de coordenadas esférico con origen en el centro de la Tierra. Considerando el radio de la Tierra (R) constante, un punto queda definido por su longitud λ y latitud ϕ . El pasaje a este sistema de coordenadas esféricas transforma la ecuación 2.64 en:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos(\phi)} \frac{\partial(\dot{\phi}N)}{\partial \phi} + \frac{\partial(\dot{\lambda}N)}{\partial \lambda} + \frac{\partial(\dot{f}_r N)}{\partial f_r} + \frac{\partial(\dot{\theta}_g N)}{\partial \theta} = \frac{S_t}{f_r} \quad [2.69]$$

Donde,

$$\dot{\phi} = \frac{C_g \cos(\theta) + U \phi}{R} \quad [2.70]$$

$$\dot{\lambda} = \frac{C_g \sin(\theta) + U_\lambda}{R \cos(\phi)} \quad [2.71]$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{C_g \tan(\phi) \cos(\theta)}{R} \quad [2.72]$$

El ángulo θ esta medido desde el norte en sentido horario, mientras que U_ϕ y U_λ son la componente meridional y zonal de la corriente. La ecuación 2.72 expresa que puede darse un cambio de dirección por más que la refracción y la difracción sean nulas ($\dot{\theta}=0$) y esto se da cuando la ola se desplaza en un círculo máximo⁹ de la Tierra.

2.2.2.2 Generación por viento

La generación y crecimiento del oleaje debido a la acción del viento constituye un problema científico de gran complejidad, tanto desde el punto de vista teórico, ya que involucra el movimiento turbulento del aire sobre una superficie que varía en espacio y tiempo, como desde el punto de vista experimental por la dificultad que conlleva realizar mediciones directas. Si bien quedan muchos aspectos por entender de la interacción entre el oleaje y la atmósfera, se han obtenido resultados satisfactorios para los intereses ingenieriles a partir de parametrizaciones basadas en las teorías de Phillips (1957) y Miles (1957).

Phillips postuló que la generación del oleaje se debía a fluctuaciones de presión en el campo de viento las cuales generaban fluctuaciones en la superficie libre. Estas últimas se propagan libremente mientras que las fluctuaciones de presión se propagan en la dirección del viento y se pueden concebir como una sumatoria de ondas de presión de distintas longitudes de ondas. Algunas de estas componentes van a compartir la misma longitud de onda, velocidad y dirección de propagación con ondas libres generadas en la superficie libre del mar. De esta forma se establece un mecanismo de resonancia por el cual el viento le transfiere energía al oleaje. Phillips plantea que para un viento constante en el tiempo, la transferencia de energía también es constante en el tiempo lo que resulta en un crecimiento lineal del oleaje,

$$S_{viento,1} = \alpha. \text{ Con } \alpha = \alpha(f, \theta, U_w) \quad [2.73]$$

Donde U_w es la velocidad del viento. La teoría de Phillips da una explicación a la generación del oleaje pero postula que el oleaje en su crecimiento no afecta el mecanismo que lo genera. Este resultado no es consistente con la evidencia de que las características del campo de viento sobre la superficie del mar es afectada por el oleaje. En este sentido, la teoría de Miles establece que el oleaje afecta el movimiento del aire induciendo modificaciones en el campo de presiones sobre la superficie libre. Estas presiones inducidas por el oleaje favorecen el desarrollo del mismo, estableciéndose un mecanismo de retroalimentación positiva. Dada una ola, sobre la porción de la superficie libre a barlovento de la cresta, que se desplaza hacia abajo, la ola induce presiones manométricas positivas, mientras que sobre la porción a sotavento de la cresta, que se desplaza hacia arriba, la ola induce presiones manométricas negativas. De esta forma, el viento ejerce un trabajo positivo sobre la superficie libre del mar aportándole energía cada vez más, ya que las presiones inducidas por el oleaje crecen cuando el oleaje crece, lo que resulta en un crecimiento exponencial en el tiempo que Miles lo formuló de la siguiente forma:

⁹ Círculo que queda definido al cortar una esfera con un plano que pasa por su centro y la divide en dos hemisferios.

$$S_{viento,2} = \beta E(f, \theta). \text{ Con } \beta \sim [U \cos(\theta - \theta_w) / c]^2 \quad [2.74]$$

Donde θ_w es la dirección del viento. Distintas campañas de medición han confirmado cualitativamente a este mecanismo como el principal responsable de la transferencia de energía del viento al oleaje y a partir de los datos obtenidos en las mismas se han propuesto distintas formulaciones para β .

Combinando la teoría de Phillips y Miles, el término de 2.64 correspondiente al aporte de energía por parte del viento queda:

$$S_{viento} = S_{viento,1} + S_{viento,2} = \alpha + \beta E(f, \theta). \quad [2.75]$$

Según esta expresión, y para cualquiera de las formulaciones existentes para α y β , el aporte de energía por parte del viento se concentra en torno al pico del espectro y en la zona de las altas frecuencias.

2.2.2.3 Interacciones no lineales

La existencia de procesos de resonancia entre distintas componentes del oleaje hace posible la transferencia de energía entre ellos. El proyecto JONSWAP (Hasselmann et. al. 1973) mostró el importante rol que juega en el desarrollo del oleaje la interacción entre grupos de cuatro olas. Previamente, Hasselmann(1962) había sentado las bases teóricas demostrando que grupos de cuatro olas (cuadrupletes) pueden intercambiar energía si cumplen la condición de resonancia planteada en 2.76 y que dicha transferencia de energía se puede calcular mediante una integral de Boltzmann (2.77).

$$\begin{cases} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 + \vec{k}_4 \\ f_1 + f_2 = f_3 + f_4 \end{cases} \quad [2.76]$$

Donde \vec{k}_i es el vector número de onda y f_i la frecuencia.

$$S_{nl,4}(\vec{k}_1) = \iiint G(\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3, \vec{k}_4) \times \delta(\vec{k}_1 + \vec{k}_2 - \vec{k}_3 - \vec{k}_4) \times \delta(f_1 + f_2 - f_3 - f_4) \times [N_1 N_2 (N_3 + N_4) - N_3 N_4 (N_1 + N_2)] d\vec{k}_2 d\vec{k}_3 d\vec{k}_4 \quad [2.77]$$

$S_{nl,4}(\vec{k}_1)$ constituye la transferencia de acción del oleaje a la componente definida por \vec{k}_1 debido a la interacción por cuadrupletes. N_i es la acción del oleaje correspondiente a la componente \vec{k}_i , a G se la conoce como coeficiente de acoplamiento y presenta una compleja expresión dada por Herterich y Hasselmann (1980), mientras que la función delta de Dirac (δ) garantiza que solo contribuyan a la integral las componentes que verifiquen la condición de resonancia.

El proceso de interacción entre cuadrupletes es uno de los mecanismos más relevantes en el desarrollo del oleaje en aguas profundas. Este mecanismo no modifica la energía del oleaje en su globalidad sino que la redistribuye dentro del espectro. Este proceso es el responsable de estabilizar el oleaje en aguas profundas en un espectro tipo JONSWAP.

El cálculo numérico de la integral de Boltzmann (2.77) requiere de grandes recursos computacionales. Muchos investigadores han tratado de desarrollar diferentes técnicas numéricas que permitan resolver la ecuación de forma más eficiente. Una de estas

aproximaciones, propuesta por Hasselmann et. al. (1985), conocida como aproximación de interacción discreta (DIA), ha sido empleada por muchos modelos operacionales, logrando obtener buenos resultados empleando tiempos de cálculo razonables.

La interacción entre cuádrupletes es un mecanismo de suma relevancia en aguas profundas pero también ocurre y es importante en aguas poco profundas. En el caso de aguas poco profundas, donde las olas son no dispersivas, además de la interacción entre cuádrupletes, adquiere relevancia la interacción triádica entre las componentes del oleaje que verifican la siguiente condición de resonancia:

$$\begin{cases} \vec{k}_1 + \vec{k}_2 = \vec{k}_3 \\ f_1 + f_2 = f_3 \end{cases} \quad [2.78]$$

La interacción triádica transfiere energía hacia las altas frecuencias. Se entiende que junto a la rotura inducida por el fondo, son los mecanismos responsables de estabilizar el oleaje en aguas someras en un espectro tipo TMA. Por otra parte, a la interacción triádica también se le atribuye la formación de otro pico en el espectro en una frecuencia igual al doble de la frecuencia pico original. La interacción triádica puede ser aproximada mediante la expresión propuesta por Eldeberky (1996) conocida como LTA (*lumped-triad approximation*):

$$\begin{cases} S_{nl,3}(f, \theta) = S_{nl,3}^+(f, \theta) + S_{nl,3}^-(f, \theta) \\ S_{nl,3}^+(f, \theta) = C_{nl,3} c C_g |\sin(\beta_{pico})| [E^2(f/2, \theta) - 2E(f/2, \theta)E(f, \theta)] \\ S_{nl,3}^-(f, \theta) = -2S_{nl,3}^+(2f, \theta) \end{cases} \quad [2.79]$$

El término $S_{nl,3}^+(f, \theta)$ representa la energía recibida de la frecuencia $f/2$, mientras que el término $S_{nl,3}^-(f, \theta)$ representa la energía transferida a la frecuencia $2f$. $C_{nl,3}$ es un coeficiente de acople que depende de la profundidad, frecuencia y número de onda y β_{pico} se determina a partir del número de Ursell¹⁰.

Por lo tanto, el término de 2.64 correspondiente a las interacciones no lineales, se obtiene de sumar las interacciones por cuádrupletes y triádicas,

$$S_{nl} = S_{nl,3} + S_{nl,4} \quad [2.80]$$

2.2.2.4 Procesos de disipación

En aguas profundas el oleaje disipa su energía fundamentalmente por la rotura de las olas. Este proceso se lo conoce como *white-capping* y junto a la generación por viento e interacción no-lineal por cuádrupletes, son los mecanismos principales que gobiernan el desarrollo del oleaje en aguas profundas. De los tres, el proceso de *white-capping* es del que menos conocimiento se tiene. Las dificultades de su entendimiento radican en la no linealidad de la hidrodinámica, en el amplio rango de escalas involucradas, en la carencia de una definición precisa del fenómeno y lo dificultoso que resulta obtener datos cuantitativos. Debido a esta falta de conocimiento, la parametrización del proceso de *white-capping* se suele considerar como "perilla de ajuste" en la calibración de los modelos de oleaje.

¹⁰ Número adimensional que se utiliza para cuantificar el grado de no linealidad de las olas.
 $N_{Ursell} = HL^2/d^3$

Las parametrización del proceso de *white-capping* considerada en los modelos, generalmente se basa en la idea de Hasselmann et.al.(1974), en la cual se interpreta la acción de cada *white-cap* como un pulso de presión debido a su peso actuando sobre la porción de la superficie libre a sotavento de la cresta (Ver Figura 6). El peso del *white-cap* realiza un trabajo negativo extrayendo energía del oleaje, pues en la zona donde actúa, la componente vertical del desplazamiento de la superficie libre es ascendente. Hasselmann (1974) formuló este mecanismo en base a la siguiente expresión:

$$S_{wc}(f, \theta) = -\mu f E(f, \theta). \quad [2.81]$$

Donde μ es función de las propiedades no locales del espectro, introduciendo una cierta no-linealidad a través de S_{wc} . Si bien la rotura por *white-capping* es localmente un proceso fuertemente no lineal, en promedio constituye un proceso débilmente no-lineal. Por lo tanto al término S_{wc} se lo considera como cuasi-lineal.

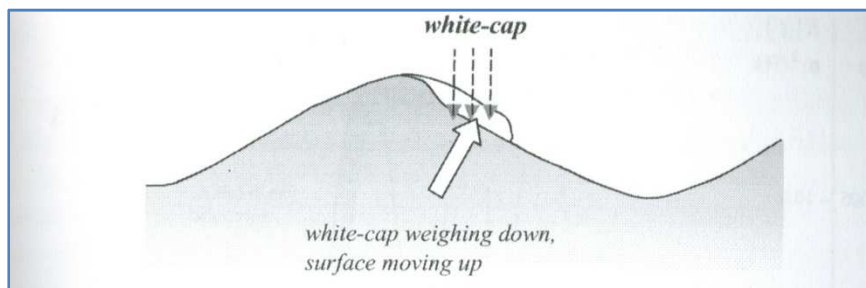


Figura 6- Esquema del proceso de *white-capping*. Tomado de Holthuijsen (2007).

Si bien en aguas profundas el proceso de *white-capping* es el principal mecanismo por el cual el oleaje pierde energía, la interacción con la turbulencia presente en la columna de agua, la interacción con las capas altas del océano y la transferencia de energía hacia ondas largas constituyen otros procesos que le quitan energía al oleaje y de los cuales también se conoce poco. De todas formas, existen algunas parametrizaciones como las propuestas por Teixeira y Blecher (2002) para la interacción con la turbulencia o el trabajo de Arduin y Jenkins (2006) sobre la interacción con las capas superiores del océano.

En profundidades intermedias y en aguas poco profundas, además del proceso de *white-capping* que continúa su accionar, el oleaje pierde energía debido a los procesos de disipación por interacción con el fondo y debido a la rotura inducida por el fondo.

Entre los procesos disipativos debidos a la interacción del oleaje con el fondo, el mecanismo principal es la transferencia de energía y cantidad de movimiento desde el movimiento orbital que tiene lugar en la columna de agua hacia el movimiento turbulento que tiene lugar en la capa límite de pequeño espesor que se desarrolla sobre el fondo. Este proceso se lo denomina fricción de fondo y depende de las características del oleaje y las características del fondo (tamaño y tipo de sedimentos, presencia de formas de fondo, etc.). Además de la fricción de fondo, la percolación en un lecho permeable o la absorción de energía por parte de un lecho móvil, constituyen otros procesos que le quitan energía al oleaje asociados a la interacción con el fondo.

Si u_{fondo} y τ_{fondo} son la velocidad y tensión rasante en la horizontal sobre el límite superior de la capa límite turbulenta, la tasa de disipación de energía por fricción de fondo, promediada en el tiempo y por unidad de área se puede expresar de la siguiente forma:

$$\bar{D}_{friccion} = -\overline{\tau_{fondo} u_{fondo}} \quad [2.82]$$

La velocidad u_{fondo} se puede estimar a partir de la teoría lineal, mientras que la tensión rasante τ_{fondo} presenta una mayor dificultad. Para ello se recurre a una expresión del tipo:

$$\tau_{fondo} = \rho C_{fr} u_{fondo}^2 \quad [2.83]$$

Collins (1972) consideró a C_{fr} como un coeficiente de arrastre al que se determina empíricamente. A este tipo de representación de τ_{fondo} se la conoce como modelo de arrastre turbulento, mientras que los modelos como el de Madsen et.al (1988) o Webber (1991) que determinan C_{fr} a partir de la rugosidad del fondo de Nikuradse y el parámetro de Shields, se los conoce como modelos de viscosidad-remolino. Combinando las expresiones 2.82 y 2.83 se obtiene para una ola monocromática:

$$\bar{D}_{friccion} = -\overline{\rho C_{fr} u_{fondo}^3} \quad [2.84]$$

Para oleaje irregular Collins (1972) propuso:

$$\bar{D}_{friccion} = -\rho C_{fr} u_{rms,fondo}^2 u_{rms,fondo} \quad [2.85]$$

A partir de la teoría lineal y del espectro se puede calcular $u_{rms,fondo}$ como:

$$u_{rms,fondo} = \left[\int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left(\frac{2\pi f}{\sinh(kh)} \right)^2 E(f, \theta) df d\theta \right]^{1/2} \quad [2.86]$$

Distribuyendo $u_{rms,fondo}^2$ en cada componente del oleaje, sustituyendo $u_{rms,fondo}$ por la expresión 2.85 y dividiendo entre ρg se obtiene una expresión de la fricción de fondo para cada componente en términos de la densidad de varianza:

$$S_{fricción}(f, \theta) = -\frac{C_{fr}}{g} \left(\frac{2\pi f}{\sinh(kh)} \right)^2 E(f, \theta) u_{rms,fondo} \quad [2.87]$$

La base física del modelo viscosidad-remolino (Webber, 1991) permite obtener resultados muy precisos de la fricción de fondo siempre y cuando se cuente con información suficiente sobre las características del fondo. En general no se cuenta con tal información por lo que los modelos recurren a la parametrización JONSWAP (Hasselmann et.al., 1973). Esta parametrización, de base puramente empírica, prescinde de información sobre las características del fondo ya que considera que $C_{fr} g u_{rms,fondo} = \Gamma$. Donde $\Gamma = 0.038 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ si predomina el mar de fondo o $\Gamma = 0.067 \text{m}^2 \text{s}^{-3}$ cuando predomina el oleaje de viento. Los buenos resultados obtenidos a partir de este modelo simplificado muestran, según Tolman (1994), que las condiciones de oleaje son la que dominan la disipación por fricción de fondo.

En las proximidades de la costa, debido a la poca profundidad, las olas comienzan a romper disipando rápidamente su energía. El modelo de Battjes y Jansen (1978) es y ha sido ampliamente utilizado en distintos modelos de oleaje para representar la disipación de energía

debido a la rotura por fondo. Battjes y Jansen (1978) establecen una analogía entre la disipación de energía de una ola luego de su rotura con la disipación de energía que tiene lugar en un resalto hidráulico. De esta forma, proponen la expresión 2.88 para modelar la tasa de disipación de energía de una ola, por unidad de área horizontal, luego de romper.

$$D_{rotura,ola} = -\frac{1}{4}\alpha_{BJ}\rho g \frac{1}{T}H^2 \quad [2.88]$$

Siendo α_{BJ} un coeficiente de calibración cuyo valor se suele considerar próximo a 1, mientras que T y H son el período y la altura de la ola respectivamente.

Para el caso de oleaje irregular en zona de poca profundidad, Battjes y Jansen (1978) consideran que tanto la condición de rotura como la altura de una ola luego de romper quedan definidas a partir de:

$$H_{rotura} = \gamma h. \quad [2.89]$$

Donde h es la profundidad y a γ se lo conoce como coeficiente de rotura. Si bien Battjes y Stive (1985) muestran una dependencia entre γ y el peralte de la ola en aguas profundas, esta relación no resulta práctica para incorporar en una ecuación como 2.64, definida en coordenadas de Euler. Por lo tanto γ se considera igual a una constante. Los datos analizados por Battjes y Stive (1985) muestran que γ varía entre 0.6 y 0.83 con una media de 0.73, mientras que Kaminsky y Kraus (1993) obtuvieron valores de γ entre 0.6 y 1.59, con una media de 0.78. El criterio de rotura expresado en 2.89 determina, por un lado, la altura de las olas rotas y por otro establece un límite superior para la altura de las olas que no rompieron ($H_{sinromper} < H_{rotura}$). Por lo tanto, para el caso de oleaje irregular en zona de poca profundidad, Battjes y Jansen (1978) consideran que las alturas de ola se ajustan a una distribución de probabilidad del tipo Rayleigh truncada en una altura de ola máxima (H_{rotura}). Esta consideración permite determinar la fracción de olas rotas (Q_R) a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{1-Q_R}{\ln(Q_R)} = -\left(\frac{\sqrt{8m_0}}{H_{rotura}}\right) \quad [2.90]$$

Donde m_0 es el momento de orden 0 del espectro de oleaje. Combinando 2.88, 2.89 y 2.90, se obtiene la tasa de disipación de energía media debido a la rotura de fondo, correspondiente a oleaje irregular:

$$\overline{D_{rotura}} = -\frac{1}{4}Q_R\alpha_{BJ}\rho g\bar{f}H_{rotura}^2 \quad [2.91]$$

Donde \bar{f} es la frecuencia media de las olas rotas. Esta tasa de disipación corresponde al oleaje en su totalidad, para distribuirla entre las componentes, de forma de incorporarla a la ecuación de balance de la acción del oleaje, se considera que el espectro de oleaje no cambia su forma debido al proceso de rotura por fondo. Esta consideración fue verificada en campo y laboratorio para el caso de espectros unimodales. Por lo tanto, según el modelo de Battjes y Janssen (1978), la disipación debido a la rotura por fondo, para cada componente y en términos de la densidad de varianza, se determina mediante la siguiente expresión:

$$S_{rotura}(f, \theta) = -\left(\frac{1}{4}Q_R\alpha_{BJ}\bar{f}H_{rotura}^2\right)\frac{E(f,\theta)}{m_0} \quad [2.92]$$

Por lo tanto, el término de 2.64 correspondiente a la disipación de energía se compone de sumar la disipación por *white-capping* (S_{wc}), la disipación por fricción de fondo ($S_{fricción}$), la disipación por rotura inducida por el fondo (S_{rotura}) y otro término ($S_{otros,ds}$). Este último incluye a los procesos disipativos de menor orden de importancia, pero que en determinados casos particulares pueden ser relevantes, como la interacción con la turbulencia y las capas superiores del océano (aguas profundas) o la percolación en un lecho poroso y la interacción con un fondo móvil (aguas intermedias y poco profundas) o la transferencia de energía hacia ondas largas.

$$S_{ds} = S_{wc} + S_{fricción} + S_{rotura} + S_{otros,ds} \quad [2.93]$$

Otro proceso que afecta la evolución del oleaje y que si bien no es disipativo involucra al fondo, es la reflexión parcial de energía debido a cambios en la profundidad. Kreisel (1949) mostró que para variaciones de fondo pequeñas en relación a la profundidad, el coeficiente de reflexión para un oleaje irregular depende del espectro de la batimetría del fondo. En base a esta idea, Arduhin y Magne (2007) propusieron una parametrización del término fuente $S_{reflexión}$. Este término se puede incorporar en 2.93 y por ende en 2.64 y establece un mecanismo por el cual la energía no se disipa, sino que se redistribuye en el espectro direccional.

2.2.2.5 Síntesis de los procesos que afectan la evolución del oleaje

En los apartados 2.2.2.1 a 2.2.2.4 se presentó la forma en que los distintos procesos que transforman el oleaje son contemplados por la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje. En la Tabla 2 se listan estos procesos y se indica la importancia relativa de los mismos según la zona que se esté analizando. Mientras que en la Figura 7 se presenta un esquema cualitativo de como se transforma un espectro de frecuencias tipo JONSWAP en aguas profundas y en aguas poco profundas, debido a los procesos incorporados en el término fuente. Se observa la magnitud relativa de la transferencia de energía correspondiente a cada proceso y sobre qué zona del espectro actúan.

Tabla 2.-Importancia relativa de los procesos que afectan la evolución del oleaje. Tomado de Battjes (1994).

Procesos	Aguas Oceánicas	Aguas Costeras		
		Plataforma Continental	Proximidad de la Costa	Rada Portuaria
Generación por viento	XXX	XXX	X	O
Interacción no lineal entre cuadrupletes	XXX	XXX	X	O
White-capping	XXX	XXX	X	O
Fricción de fondo	O	XX	XX	O
Refracción y asomeramiento debido a una corriente	O/X	X	XX	O
Refracción y asomeramiento debido a variaciones del fondo	O	XX	XXX	XX
Rotura por fondo	O	X	XXX	O
Interacción no lineal entre tríadas	O	O	XX	X
Reflexión	O	O	X/XX	XXX
Difracción	O	O	X	XXX

XXX=Dominante, XX=Significativo pero no dominante, X=Importancia menor, O=Irrelevante

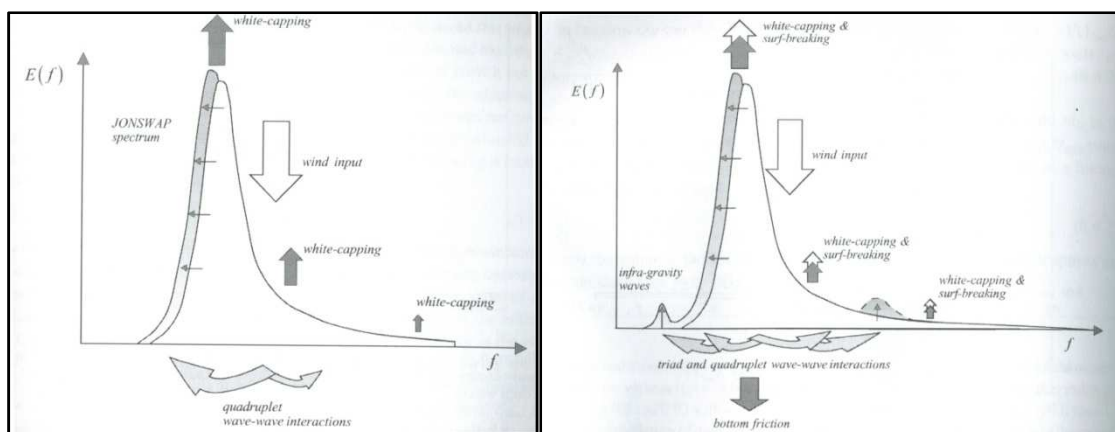


Figura 7.- Esquema cualitativo de como un espectro JONSWAP es transformado por los distintos procesos que afectan la evolución del oleaje en aguas profundas (izq.) y en aguas poco profundas (der.). Tomado de Holthuijsen (2007).

2.2.3 WAVEWATCH III Versión 3.14

2.2.3.1 Generalidades

El modelo WAVEWATCH III (Tolman, 1997,1999,2009) es un modelo de base física de tercera generación que resuelve la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje aplicada a un espectro definido en el espacio de los números de onda y las direcciones. Fue desarrollado en la División de Análisis y Modelación Marina (MMAB) del Centro de Modelación Ambiental (EMC) del Centro Nacional para la Predicción Ambiental (NCEP) de Estados Unidos. Sus predecesores directos son los modelos WAVEWATCH I (Tolman, 1989, 1991) y WAVEWATCH II (Tolman 1992) desarrollados en la Universidad de Delft y en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA respectivamente. Si bien representa una continuidad respecto a sus predecesores, difiere significativamente de los mismos, tanto en las parametrizaciones de los procesos físicos, como en las aproximaciones numéricas y la estructura de programación.

En el apartado 2.2.3.2 se presentan las parametrizaciones de los procesos físicos que el modelo tiene implementadas, mientras que en el apartado 2.2.3.3 se presentan los esquemas numéricos que utiliza.

2.2.3.2 Parametrización de los procesos físicos

Entre los distintos procesos físicos presentados en 2.2.2, el WAVEWATCH III ofrece la posibilidad de escoger entre distintas parametrizaciones de algunos de ellos, entre las cuales el usuario tiene que escoger la que va a utilizar antes de compilar el modelo. Mientras que para el resto de los procesos, ofrece una única parametrización o bien no se encuentran aún implementados.

Los procesos físicos descritos en 2.2.2 que no se encuentran implementados en el WAVEWATCH III son la interacción triádica y la difracción del oleaje. Como se indica en la Tabla 2, la interacción triádica es relevante pero no dominante en la zona de poca profundidad próxima a la costa, mientras que la difracción es dominante en el entorno de obstáculos o cambios drásticos de la profundidad de fondo en zonas de poca profundidad. Por lo tanto el WAVEWATCH III no resulta propicio para obtener el oleaje al abrigo de una punta rocosa, una isla o una estructura, o bien en una zona próxima a la costa que presente una batimetría compleja.

Los procesos que cuentan con una única parametrización son: la fricción de fondo, la rotura inducida por el fondo, la dispersión por el fondo y el término lineal de aporte de energía por parte del viento ($S_{viento,1}$, 2.73). La fricción de fondo se modela mediante la parametrización JONSWAP (Hasselmann et.al., 1973), la disipación de energía debido a la rotura por fondo se parametriza mediante 2.92 (Battjes y Jansenn, 1978), la dispersión por fondo la calcula a partir de Arduhin y Magne (2007) y para el término lineal de aporte de energía del viento considera la parametrización propuesta por Cavaleri y Malanote-Rizzoli (1981). El usuario puede optar o no por considerar cada uno de estos procesos. La decisión la debe especificar al compilar el modelo.

Para el cálculo de las interacciones no lineales por cuádrupletes dispone de dos opciones: la aproximación por interacción discreta (DIA, Hasselmann et. al. 1985) y el método denominado Webb-Resio-Tracy (WRT). Este último resuelve la integral de Boltzman (2.77) con una serie de transformaciones propuestas por Webb (1978), Tracy y Resio (1982) y Resio y Perrie (1991) que permiten remover las funciones delta de Dirac. Más allá de dichas consideraciones, el método sigue siendo costoso computacionalmente, requiriendo entre 10^3 y 10^4 veces más recursos computacionales que la aproximación DIA. Por lo tanto solo es recomendado para aplicarse en pequeños dominios de cálculo en el estudio de casos idealizados.

Los procesos de aporte de energía por el viento ($S_{viento,2}$, 2.74) y los procesos disipativos que no involucran al fondo, son agrupados por el WAVEWATCH III brindando la opción de escoger entre tres posibles paquetes: WAM-3 (ST1), Tolman y Chalikov (ST2) y WAM-4 y sus variantes (ST3).

El paquete ST1 corresponde a los términos fuente de aporte de energía por el viento ($S_{viento,2}$) y disipación por *white-capping* (S_{wc}) empleados por el modelo WAM en sus ciclos 1 a 3. El término $S_{viento,2}$ está parametrizado mediante 2.74 y para la función β se considera la propuesta de Snyder et. al. (1981). Mientras que el término S_{wc} está parametrizado mediante 2.81 y para la función μ se considera la propuesta de Komen et. al. (1984).

El paquete ST2 (Tolman y Chalikov, 1996) consiste en el término de aporte de energía por el viento propuesto por Chalikov y Belevich (1993) y Chalikov (1995) y en dos términos disipativos, discriminando entre los procesos que disipan la energía en las altas frecuencias de los que disipan la energía en las bajas frecuencias. El término de aporte de energía por parte del viento tiene un aspecto similar a 2.74, involucrando en la parametrización de la función β la velocidad del viento a una altura que depende de las características del oleaje. La misma, se obtiene a partir de la velocidad de viento a la altura correspondiente al dato de entrada, considerando un perfil logarítmico de velocidades y una velocidad de corte estimada a partir de Janssen (1989). Tolman (2002) realizó pruebas a nivel de modelos globales utilizando este paquete y propuso la adición de un nuevo término que represente la disipación de energía de un mar de fondo que se propaga en oposición al viento. A su vez, propuso una corrección en la velocidad del viento a los efectos de evitar la subestimación detectada del crecimiento del oleaje en aguas profundas.

El paquete ST3 se basa en los términos fuentes empleados por el ciclo 4 del modelo WAM y en algunas variantes de los mismos. La parametrización del término de aporte de energía por el viento es la propuesta por Jansen (1991). Esta parametrización, al igual que la del paquete ST2,

tiene un aspecto similar a 2.74 y la función β tiene en cuenta la afectación del oleaje sobre el viento en superficie. El término disipativo, al igual que el paquete ST1, consiste esencialmente en una expresión como 2.81 pero para la función μ se consideran las adaptaciones propuestas por Janssen (1994) y Bidlot et.al.(2005). El paquete ST3 posibilita modificar este término, incorporando la idea de saturación del espectro y también adicionar dos términos fuentes disipativos, uno correspondiente al decaimiento del mar de fondo debido a la pérdida de energía por interacción con la atmósfera al recorrer largas distancias y otro debido a la interacción con la turbulencia. La parametrización empleada para el decaimiento del mar de fondo es la propuesta por Ardhuin et al.(2008), mientras que para la interacción con la turbulencia es la de Teixeira y Belcher (2002) modificada por Ardhuin y Jenkins (2006).

2.2.3.3 Resolución numérica

El esquema numérico que resuelve la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje está planteado sobre una grilla espacial, una grilla espectral y una discretización del período de tiempo simulado. Las incógnitas del modelo $N_{i,j,l,m}^n$, hacen referencia a la acción del oleaje correspondiente a la componente espectral definida por los subíndices l y m , en el punto geográfico definidos por los subíndices i y j , para el instante de tiempo t^n .

La grilla espacial constituye una discretización del dominio geográfico y puede ser expresada en coordenadas cartesianas (x,y) o en coordenadas esféricas (ϕ, λ) . El uso de las primeras es adecuado para dominios espaciales chicos cuyas dimensiones no superan las decenas de kilómetros. En el caso del modelo URU-WAVE, necesariamente debe emplearse una grilla espacial definida en coordenadas esféricas. La grilla espacial es regular y queda definida por el usuario a partir de sus vértices y los incrementos $\Delta x - \Delta y$ o $\Delta \phi - \Delta \lambda$, según las coordenadas utilizadas. En lo que respecta a las condiciones de borde espaciales, en los bordes tierra-agua, el modelo considera que la energía del oleaje que se propaga del agua hacia la tierra es absorbida completamente sin reflexión, mientras que las componentes que se propagan hacia mar adentro las considera que parten del borde tierra-agua sin energía. Por su parte, en los llamados bordes activos¹¹, la energía de las componentes que se propagan saliendo del dominio es absorbida, mientras que las componentes que se propagan hacia adentro del dominio parten con la energía impuesta por la condición de borde.

La grilla espectral constituye una discretización del dominio espectral. Si bien el usuario define una grilla en el dominio de las frecuencias y direcciones, la cual es invariante en el tiempo y espacio, el WAVEWATCH III, para realizar los cálculos, la transforma mediante la ecuación de dispersión (2.30) al dominio de los número de onda y direcciones. Por lo tanto la grilla espectral queda definida localmente siendo función de la profundidad. La razón de ser de esta transformación es no perder resolución cuando los cálculos se realizan en aguas poco profundas. La grilla espectral que define el usuario es una grilla espectral logarítmica en el dominio de las frecuencias, que queda definida por la frecuencia más baja, el factor de incremento de las frecuencias (X_f) y la cantidad de frecuencias. De esta forma,

$$f_{m+1} = X_f f_m \quad [2.94]$$

¹¹ Agua-agua

Esta definición es usual en los modelos de oleaje de tercera generación y responde a la necesidad de agilizar los tiempos de cálculo del término fuente correspondiente a las interacciones no-lineales (S_{nl}). Usualmente se utiliza $X_f = 1.1$. En cuanto a las direcciones, la grilla espectral está dividida uniformemente en el círculo completo. En cuanto a las condiciones de borde en el dominio espectral, no son necesarias en las direcciones por estar el espectro definido en todo el círculo, pero si se requieren para la frecuencia. Por lo tanto para frecuencias menores a la frecuencia más baja definida, el modelo considera que no hay energía, mientras que para frecuencias mayores que la frecuencia más alta definida, el modelo asume una forma paramétrica del espectro.

Para avanzar en el tiempo, el modelo resuelve por separado los distintos procesos involucrados en la ecuación de balance de la acción del oleaje, utilizando pasos de tiempo convenientes para cada caso. Esta estrategia, denominada *Fractional step method*, permite que el modelo pueda ser eficientemente vectorizado y paralelizado al mismo tiempo.

Por un lado, las variaciones temporales del nivel medio del mar son consideradas de forma cuasi-estacionaria. La profundidad varía con un paso de tiempo que depende de la escala temporal del fenómeno asociado (marea astronómica o meteorológica por ejemplo) y no de consideraciones numéricas. Al cambiar la profundidad, se actualiza la grilla espectral en el número de onda mediante un método de interpolación conservativo. La grilla espectral permanece invariante hasta el siguiente paso, siendo utilizada por el modelo para la resolución de la propagación espacial, la propagación en el dominio espectral (propagación intra-espectro) y la integración del término fuente. Cada uno con su paso de tiempo correspondiente.

El WAVEWATCH III hace una distinción entre cuatro pasos de tiempo diferentes: paso de tiempo global (Δt_g), paso de tiempo correspondiente a la propagación espacial, paso de tiempo correspondiente a la propagación intra-espectro y el paso de tiempo considerado para la integración del término fuente.

El paso de tiempo global es definido por el usuario, es fijo, y es el paso mediante el cual la solución entera avanza en el tiempo y se actualizan los campos de entrada al modelo: viento, corrientes, niveles y concentraciones de hielo.

En el caso de la propagación espacial, el usuario define un paso de tiempo de referencia ($\Delta t_{p,r}$) correspondiente a la componente del oleaje cuya frecuencia es más baja y por lo tanto es la componente que se propaga más rápido. Para la componente m, cuya frecuencia es mayor que la de referencia, el paso de tiempo para el cálculo de la propagación espacial se obtiene a partir de:

$$\Delta t_{p,m} = \frac{\dot{x}_{p,r}}{\dot{x}_{p,m}} \Delta t_{p,r} \quad [2.95]$$

Donde $\dot{x}_{p,r}$ y $\dot{x}_{p,m}$ son la velocidad de advección de la componente de referencia y la componente m respectivamente. De esta forma, cada componente se propaga en el espacio con su propio paso de tiempo lo que resulta en cálculos más eficientes. En general estos pasos de tiempo son menores que Δt_g por lo que la contribución de la propagación espacial a la solución global es calculada mediante una cierta cantidad de pasos sucesivos.

Un tercer paso de tiempo es definido para resolver la propagación intra-espectro. Usualmente para aguas profundas e intermedias se lo define igual a Δt_g , mientras que para aguas poco profundas donde la refracción es significativa, es necesario reducirlo a una fracción de Δt_g a los efectos de evitar inestabilidades numéricas.

El último paso de tiempo es el utilizado en la integración del término fuente. El usuario fija un paso de tiempo mínimo y luego el modelo para cada punto de grilla y para cada Δt_g define un paso de tiempo conveniente. Este paso de tiempo se va a achicar cuando las condiciones de viento y oleaje varíen fuertemente, permitiendo un cálculo preciso, o bien se agranda cuando las variaciones son lentas, permitiendo reducir los tiempos de cálculo.

Resolver la propagación espacial implica resolver los primeros tres términos de 2.65. A continuación y a los efectos de simplificar la notación se presentan en coordenadas cartesianas y sin considerar la presencia de una corriente:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_{gx}N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_{gy}N)}{\partial y} = 0 \quad [2.96]$$

El esquema numérico está planteado en volúmenes finitos lo cual garantiza la conservación de la acción del oleaje. Por lo tanto queda de la siguiente forma:

$$N_{i,j,l,m}^{n+1} = N_{i,j,l,m}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i,-} - F_{i,+}] + \frac{\Delta t}{\Delta y} [F_{j,-} - F_{j,+}] \quad [2.97]$$

Siendo $F_{i,-}$ el flujo de acción del oleaje entre los puntos de grilla x_{i-1} y x_i , mientras que $F_{i,+}$ es el flujo de acción del oleaje entre los puntos x_i y x_{i+1} . Análogamente, pero sustituyendo la coordenada x por la coordenada y, así como el subíndice i por el subíndice j, se definen los flujos $F_{j,-}$ y $F_{j,+}$. Para el cálculo de los flujos el usuario puede optar entre dos esquemas: un esquema *Upwind* de primer orden (2.98), o bien por un esquema de tercer orden denominado *Ultimate Quickest TVD* (Leonard, 1979; Davis y More, 1982) (2.99).

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{i,-} = [C_{g,x,b} N_u]_{j,l,m}^n \\ C_{g,x,b} = 0.5(C_{g,x,i-1} + C_{g,x,i})_{j,l,m} \\ N_u = \begin{cases} N_{i-1} & \text{para } C_{g,x,b} \geq 0 \\ N_i & \text{para } C_{g,x,b} < 0 \end{cases} \end{array} \right. \quad [2.98]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{i,-} = [C_{g,x,b} N_b]_{j,l,m}^n \\ C_{g,x,b} = 0.5(C_{g,x,i-1} + C_{g,x,i})_{j,l,m} \\ N_b = \frac{1}{2} [(1+C)N_{i-1} + (1-C)N_i] - \left(\frac{1-C^2}{6}\right) CU \Delta x^2 \\ CU = \begin{cases} (N_{i-2} - 2N_{i-1} + N_i) \Delta x^{-2} & \text{para } C_{g,x,b} \geq 0 \\ (N_{i-1} - 2N_i + N_{i+1}) \Delta x^{-2} & \text{para } C_{g,x,b} < 0 \end{cases} \\ C = \frac{C_{g,x,b} \Delta t}{\Delta x} \end{array} \right. \quad [2.99]$$

El esquema de propagación *Ultimate Quickest* es el que utiliza por defecto el WAVEWATCH III y fue escogido a partir de una comparación de esquemas numéricos de alto orden en diferencias finitas aplicados a modelos de calidad de agua realizada por Cahyono (1994), Falconer y Cayhono (1993) y Tolman (1995). *Quickest* hace referencia al esquema numérico

mientras que *Ultimate* es un limitador que se combina al esquema numérico para que este no proporcione valores extremos sin sentido físico. Otro problema que presenta este esquema es ser susceptible a la difusión numérica o lo que se conoce como efecto *Garden Sprinkler* (GSE). Para mitigar el GSE, el WAVEWATCH III dispone de dos opciones. Una primera opción es la inclusión de un término difusivo de corrección (Booij y Holthuisjen, 1987). Esta técnica ha resultado eficaz pero requiere de la disminución del paso de tiempo y por ende repercute en los tiempos de cálculo. La segunda opción es una técnica de promediación entre puntos vecinos propuesta por Tolman (2002) y que surge como una alternativa computacionalmente más económica que la primera, permitiendo obtener resultados similares.

La presencia de obstáculos de dimensiones menores que el tamaño de grilla, como la presencia de islas, es tratada por el WAVEWATCH III con la metodología adoptada originalmente por el modelo SWAN (Booij et.al.,1999; Holthuisjen et al., 2001). La misma consiste en disminuir los flujos a través de las celdas según el grado de obstrucción que impone el obstáculo. A tales efectos, se definen los coeficientes de transparencia $\alpha_{i,-}$ y $\alpha_{i,+}$ que varían entre 0 y 1 y se incorporan al esquema de propagación de la siguiente forma:

$$N_{i,j,l,m}^{n+1} = N_{i,j,l,m}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [\alpha_{i,-} F_{i,-} - \alpha_{i,+} F_{i,+}] \quad [2.100]$$

Para que no se acumule energía artificialmente en una celda, el coeficiente de transparencia solamente se aplica a los flujos entrantes a la celda y representa la energía disipada debido a la obstrucción.

La resolución de la propagación intra-espectro implica resolver la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(kN)}{\partial k} + \frac{\partial(\dot{\theta}N)}{\partial \theta} = 0 \quad [2.101]$$

Al igual que la propagación espacial, el WAVEWATCH III brinda la posibilidad de resolverla mediante un esquema numérico de primer orden o mediante el esquema *Ultimate Quickest*.

Algunos problemas prácticos se pueden presentar cuando la velocidad de refracción ($\dot{\theta}$) es alta, como puede ser el caso de una onda larga propagándose en aguas poco profundas. Para evitar reducir los pasos de tiempo y aumentar los tiempos de cálculo, el WAVEWATCH III emplea el siguiente filtro:

$$\dot{\theta} = X_{rd}(x, y, k)\dot{\theta}_d + \dot{\theta}_c \quad [2.102]$$

Donde $\dot{\theta}_d$ es la velocidad de refracción debida al fondo, $\dot{\theta}_c$ es la velocidad de refracción debida a las corrientes y $\dot{\theta}$ es la velocidad de refracción total. X_{rd} es definido en cada punto y en cada numero de onda para que el número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), correspondiente a la propagación en θ , no supere un valor preestablecido que por defecto es 0.7. Este filtro se termina aplicando a unas pocas componentes (ondas más largas) y en pocos puntos (próximos a la costa) y el efecto del mismo es equivalente a reducir la pendiente de fondo.

Por su parte, el término fuente requiere de la resolución de la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = S \quad [2.103]$$

Para la resolución de la misma, al igual que en el modelo WAM, se emplea un esquema semi-implícito (WAMDIG, 1988) que permite calcular el incremento de la acción del oleaje ΔN a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta N(k, \theta) = \frac{S(k, \theta)}{1 - \epsilon D(k, \theta) \Delta t} \quad [2.104]$$

Donde D son los términos diagonales de la derivada de S respecto a N mientras que ϵ es el *offset* del esquema semi-implícito. El paso de tiempo que se utiliza es dinámico (Δt_d), lo que implica que se va actualizando dependiendo del valor de la magnitud del término fuente (S), un máximo valor de incremento de la acción del oleaje preestablecido ΔN_m y el tiempo restante para alcanzar Δt_g .

Para finalizar, a continuación, se hace mención a algunos detalles del tratamiento de los datos de entrada por parte del WAVEWATCH III y sobre como realiza el intercambio de información entre grillas de cálculo.

Los datos de entrada al modelo son los campos de viento, corrientes, niveles y concentraciones de hielo. Los mismos, se actualizan para cada Δt_g y mantienen sus valores constantes hasta la siguiente actualización. Si los campos están definidos para otro paso de tiempo, el WAVEWATCH III ofrece distintas técnicas de interpolación siendo la interpolación bilineal el método por defecto.

El intercambio de información entre grillas puede realizarse mediante el tradicional anidamiento en una dirección o mediante un anidamiento en dos direcciones. El primero requiere una grilla chica de mayor resolución inmersa en una grilla más grande de menor resolución. Se resuelve primero la grilla grande y luego la chica utiliza los resultados de la grande como condición de borde. Mientras que el anidamiento en dos direcciones está implementado en el WAVEWATCH III mediante el modo multi-grilla. En este modo es posible resolver distintas grillas con distinta resolución al mismo tiempo. Se requiere que previamente se defina el rango de jerarquía de cada grilla en función de la resolución de la misma y luego se consideran tres tipos de transferencia de información: transferencia desde una grilla de bajo rango a una grilla de alto rango, transferencia desde una grilla de alto rango a una de bajo rango y transferencia entre grillas de igual rango.

CAPÍTULO III

PROCESAMIENTO DE DATOS

3 Procesamiento de datos

3.1 Vientos

3.1.1 Introducción

Los modelos numéricos que simulan la generación y propagación del oleaje necesitan la información del campo de viento a 10 metros de altura. En función de esta variable calculan el proceso de suministro de energía por parte de la atmósfera hacia el mar que actúa generando y transformando el oleaje.

Los proyectos de reanálisis existentes contienen, entre otras muchas variables, el viento a 10 metros de altura, lo que constituye una base de datos sumamente provechosa para utilizar en la determinación del clima de oleaje en una determinada zona mediante modelación numérica.

El modelo URU-WAVE utilizó como datos de entrada, el campo de viento a 10 metros de altura obtenido del proyecto de reanálisis NCEP-CFSR (Saha et.al. 2010). La calidad de esta información tiene una incidencia directa en los resultados del modelo. Por lo tanto, se realizó una comparación, aplicando distintos métodos estadísticos, de los datos de viento a 10 metros de altura del proyecto de reanálisis NCEP-CFSR con los datos disponibles de mediciones del viento en el mar y en estaciones costeras.

3.1.2 Metodología

En una primera instancia, se realizó un análisis exploratorio de las distintas series de datos medidos disponibles y de los datos de reanálisis correspondientes a la región comprendida entre los meridianos 60W - 52W y los paralelos 38S - 32S. Posteriormente, se realizó la comparación entre cada una de las series de datos medidos con la serie que surge de quedarse con los datos del reanálisis NCEP-CFSR correspondientes al punto de grilla más próximo en cada caso. Para ello fue necesario en cada una de las series de datos medidos, seleccionar únicamente los datos correspondientes a las horas en la que se presentan los datos de reanálisis (00, 06, 12 y 18 UTC¹²). Luego se identificaron los datos faltantes y calmas, y se eliminaron de ambas series (datos medidos y reanálisis). De esta forma, las series que se comparan no tienen calmas y datos faltantes, y contienen datos correspondientes a los mismos instantes de tiempo. En la comparación se distinguen cuatro etapas: comparación visual, comparación de climas, cálculo de estadísticos de verificación continua y cálculo de estadísticos de verificación categórica. A continuación se describe cada una de estas etapas, así como los cálculos realizados en el análisis exploratorio.

3.1.2.1 Análisis exploratorio

En lo que respecta a las series de datos medidos, en el análisis exploratorio se determinaron los distintos parámetros que caracterizan la distribución de la intensidad del viento (promedio, cuartiles, máximo registrado, desviación estándar), los histogramas de intensidades y direcciones, la curva de distribución empírica de frecuencias acumuladas correspondiente a las intensidades, diagramas de cajas correspondientes a todos los datos de intensidades y

¹² Tiempo Universal Coordinado

discriminados en función del cuadrante de direcciones al cual corresponden y finalmente se establecieron las rosas de viento. En lo que respecta al campo de reanálisis, en el análisis exploratorio se calculó el campo de intensidad media, el campo del valor medio de la componente zonal (U), el campo del valor medio de la componente meridional (V) y rosas de viento en nueve puntos que cubren toda la región analizada, con un espaciamiento entre ellas de 2 grados tanto en latitud como en longitud.

3.1.2.2 Comparación visual

En cada caso se presentan superpuestos en un mismo gráfico los datos observados y de reanálisis en función del tiempo, abarcando un período arbitrario de dos meses. Complementariamente se presentan en diagramas de dispersión, las intensidades observadas y las obtenidas del reanálisis, discriminadas en función del cuadrante al que corresponde la dirección del viento observado.

3.1.2.3 Comparación de climas

Se compararon los histogramas de intensidades y direcciones, las curvas empíricas de distribución de frecuencias acumuladas y diagramas de cajas correspondientes a las intensidades, y las rosas de vientos.

3.1.2.4 Cálculo de estadísticos de verificación continua

Los estadísticos de verificación continua constituyen distintas medidas de la precisión con que una serie de datos estimados representa a la serie de observaciones. A continuación, Y_i y O_i hacen referencia al dato estimado y observado respectivamente, correspondientes al instante i . En este caso, el dato estimado hace referencia al dato de reanálisis y el dato observado al dato medido.

Los estadísticos de verificación continua calculados fueron:

- Error medio (EM): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i)$. Siendo N es la cantidad de datos.
- Error absoluto medio (MAE): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - O_i|$
- Error cuadrático medio (RMSE): $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i)^2}$
- Error lineal en el espacio probabilístico (LEPS): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (CDF_o(Y_i) - CDF_o(O_i))$
Siendo CDF_o la distribución empírica de frecuencias acumuladas obtenida a partir de la serie de observaciones.
- Coeficiente de correlación (r): $\frac{\sum(Y-\bar{Y})-(O-\bar{O})}{\sqrt{\sum(Y-\bar{Y})^2} \sqrt{\sum(O-\bar{O})^2}}$ Donde \bar{Y} y \bar{O} son los valores medios de las series estimadas y observadas.
- Indicadores de habilidad (*Skill score*): $\frac{(Score_{estimador} - Score_{referencia})}{(Score_{perfecto} - Score_{referencia})}$. Como indicador o *Score* se utilizó el error medio absoluto (MAE) y los estimadores de referencia utilizados fueron la persistencia (SSP) y la climatología (SSC).

3.1.2.5 Cálculo de estadísticos de verificación categórica

Considerando un umbral en el caso de la intensidad o un rango en el caso de las direcciones, es posible construir un estimador categórico binario, que estima si la intensidad supera o no un determinado umbral o si la dirección se encuentra o no comprendida en un determinado

rango. Para un estimador categórico binario se define la matriz de contingencia que se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3.- Matriz de contingencia

		Estimado	
		Si	No
Observado	Si	Acierto	Fallo
	No	Falsa Alarma	Negativo Correcto

Con las matrices de contingencias obtenidas de considerar distintos umbrales de intensidad de viento y distintos rangos de direcciones, se calcularon los siguientes estadísticos de verificación categórica:

- $BIAS = \frac{(Aciertos+Falsas Alarmas)}{(Aciertos+Fallos)}$
- Probabilidad de Detección (POD): $\frac{Aciertos}{(Aciertos+Fallos)}$
- Tasa de Falsas Alarmas (FAR): $\frac{Falsas Alarmas}{(Aciertos+Fallos)}$
- Probabilidad de Correctos (PC): $\frac{(Aciertos+Negativos correctos)}{(Aciertos+Fallos+Negativos correctos+Falsas Alarmas)}$
- Threat Score (TS): $\frac{Aciertos}{(Aciertos+Fallos+Falsas alarmas)}$
- Equitable Threat Score (ETS): $\frac{(Aciertos-Aciertos_{randómicos})}{(Aciertos+Fallos+Falsas alarmas)}$. Donde $Aciertos_{randómicos}$

hace referencia a los aciertos de un estimador randómico.

Cada uno de estos estadísticos se calculó para distintos umbrales de intensidad y se presentan en gráficos donde los datos se discriminan según el cuadrante al que corresponde la dirección del dato observado. En el caso del estimador de la dirección, se consideraron rangos definidos al dividir el círculo en 4, 8 y 16 sectores. La división en 16 secciones se presenta siempre y cuando lo permita la precisión con la que fue medida la dirección en el dato observado.

Finalmente se distribuyeron los datos en múltiples categorías definidas por rangos de intensidades y rangos de direcciones, y se calculó el indicador de habilidad de Heidke (HSS):

$$HSS = \frac{\sum_{k=1}^K P(Y_k, O_k) - \sum_{k=1}^K P(Y_k)P(O_k)}{1 - \sum_{k=1}^K P(Y_k)P(O_k)} \quad [3.1]$$

Siendo K el número total de categorías, $P(Y_k)$ la probabilidad de que el dato estimado se encuentre en la categoría k, $P(O_k)$ la probabilidad de que el dato observado se encuentre en la categoría k y $P(Y_k, O_k)$ es la probabilidad que el dato estimado y el observado caigan conjuntamente en la misma categoría k.

3.1.3 Datos e Información Utilizada

En la Figura 8 se indica la ubicación de los puntos donde fueron medidos los datos cuyas series se analizan. Se conoce que la calidad de los datos correspondientes al período analizado de la estación Carrasco y la boya oceanográfica es buena, mientras que del resto de los datos no se conocen los detalles de cómo fueron tomados. Se presume que son datos medidos a 10 metros de altura y el dato de intensidad refiere a la velocidad promediada en un período de 10 minutos.

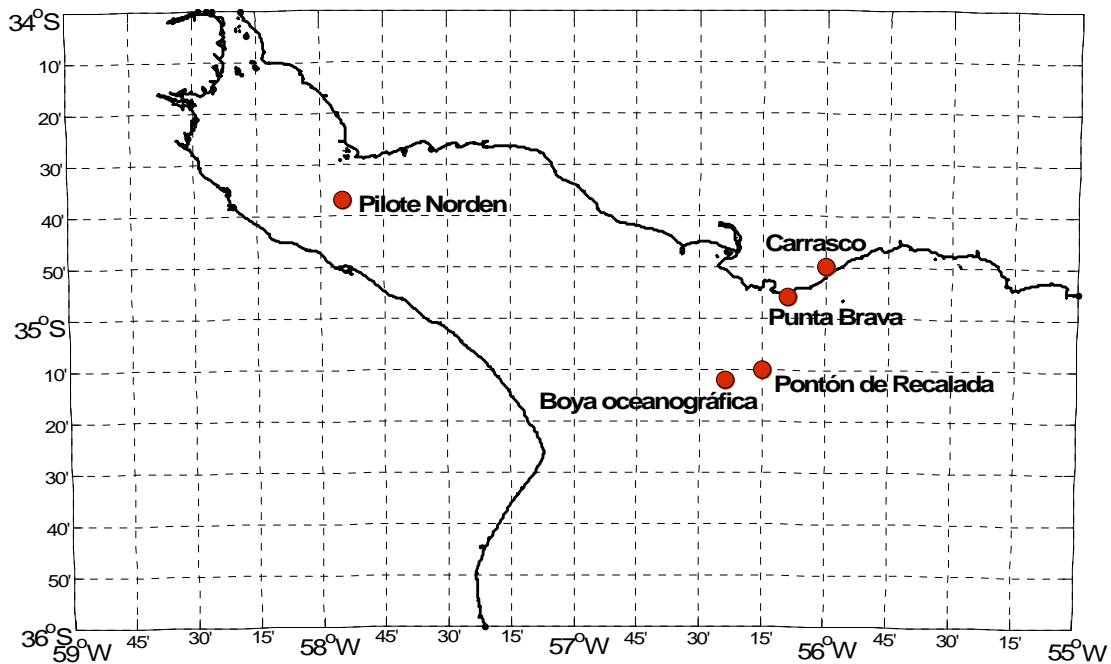


Figura 8.-Ubicación de los puntos de medición.

A continuación se detallan las características de los distintos datos utilizados.

3.1.3.1 Estación meteorológica de Carrasco

- Dependencia: Dirección Nacional de Meteorología.
- Ubicación: 34.8 S, 56 W.
- Período analizado: Enero 2007 – Diciembre 2009.
- Frecuencia en que se presentan los datos: Horaria.
- Direcciones: Cada 10°.
- Porcentaje de datos faltantes: 0.09 %.
- Porcentaje de calmas: 10.6 %.

3.1.3.2 Boya oceanográfica Proyecto FREPLATA-FFEM

La boya fue fondeada en el marco del Proyecto FREPLATA-FFEM: "Estudio de la dinámica hidrosedimentológica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos".

- Dependencia: FREPLATA - FFEM.
- Ubicación: 35.2 S , 56.4 W.
- Período analizado: 26 de noviembre de 2009 – 17 de febrero de 2010.
- Frecuencia en que se presentan los datos: Horaria.

- Direcciones: Cada 1°.
- Porcentaje de datos faltantes: 0 %.
- Porcentaje de calmas: 0 %.

La corta extensión de esta serie no permite realizar observaciones sobre la climatología del viento en este punto. Por esta razón, se obvió el análisis exploratorio de esta serie y se realizaron directamente las distintas comparaciones.

3.1.3.3 Punta Brava

- Dependencia: Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada.
- Ubicación: 34.93 S , 56.15 W.
- Período analizado: Enero 2007 – Octubre 2009.
- Frecuencia en que se presentan los datos: Tri-horaria.
- Direcciones: Cada 22.5°.
- Porcentaje de datos faltantes: 1.38 %.
- Porcentaje de calmas: 3.46 %.

3.1.3.4 Pontón de Recalada

- Dependencia: Prefectura Naval Argentina.
- Ubicación: 35.16 S , 56.25 W.
- Período analizado: Enero 1997 – Diciembre 2001.
- Frecuencia en que se presentan los datos: Tri-horaria.
- Direcciones: Cada 22.5°.
- Porcentaje de datos faltantes: 0.24 %.
- Porcentaje de calmas: 6.03 %.

3.1.3.5 Pilote Norden

- Dependencia: Riovía S.A.
- Ubicación: 34.62 S , 57.92 W.
- Período analizado: Enero 2004 – Noviembre 2009.
- Frecuencia en que se presentan los datos: Horaria.
- Direcciones: Cada 1°.
- Porcentaje de datos faltantes: 33.8 %.
- Porcentaje de calmas: 2.7 %.

3.1.3.6 Reanálisis NCEP-CFSR

El proyecto de reanálisis NCEP *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) completó 31 años correspondientes al período 1979-2009 en enero del 2010. A partir de esa fecha, el proyecto continuó y a la fecha es posible descargar el período enero 1979 – diciembre 2010. Los datos se encuentran disponibles con una resolución espacial de 0.5° x 0.5° y temporal de 6 horas en el sitio <http://drought.geo.msu.edu/data/CFSR4WRF/index.php>.

El proyecto de reanálisis NCEP-CFSR representa una mejora en cuanto a la calidad de la información respecto a sus predecesores, debido a que cuenta con una mayor resolución espacial y temporal, y fueron generados tratando a la atmósfera, océanos, hielos y continente

de forma acoplada, con sistemas de asimilación de datos y modelos de pronósticos que corresponden al estado del arte al 2010.

3.1.4 Resultados

3.1.4.1 Análisis Exploratorio

3.1.4.1.1 Estación meteorológica de Carrasco

En la Tabla 4, Figura 9 y Figura 10 se presentan las características del viento registrado en la estación meteorológica de Carrasco.

Tabla 4.- Intensidad del viento (m/s). Parámetros de su distribución. Estación Carrasco

Promedio	Desviación estándar	$q_{0.25}$	Mediana ($q_{0.5}$)	$q_{0.75}$	Máximo
4.6	2.1	3.1	4.1	5.7	18.5

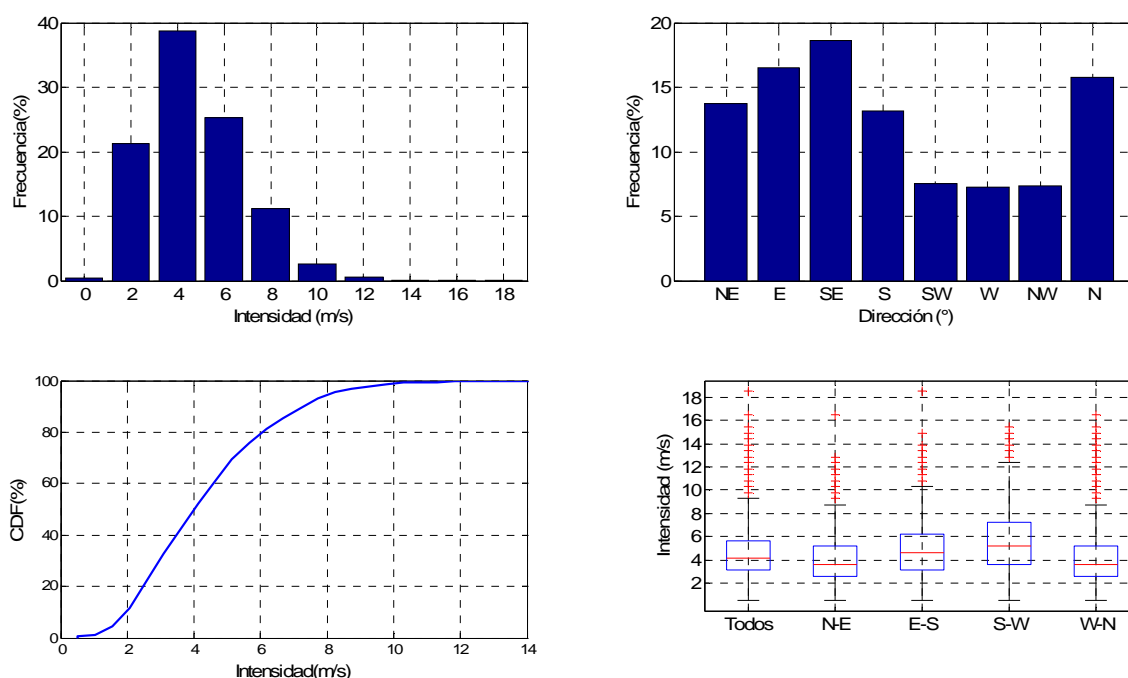


Figura 9.-Histogramas de intensidades y direcciones, distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades y diagrama de cajas discriminado por cuadrante. Estación Carrasco.

Se observa que los vientos provenientes de los cuadrantes sur (S-W y E-S) presentan mayores intensidades que los que provienen del cuadrantes norte (W-N y N-E). En particular, los vientos que provienen del cuadrante S-W son los que presentan mayores intensidades y también son los que presentan menores frecuencias de ocurrencia.

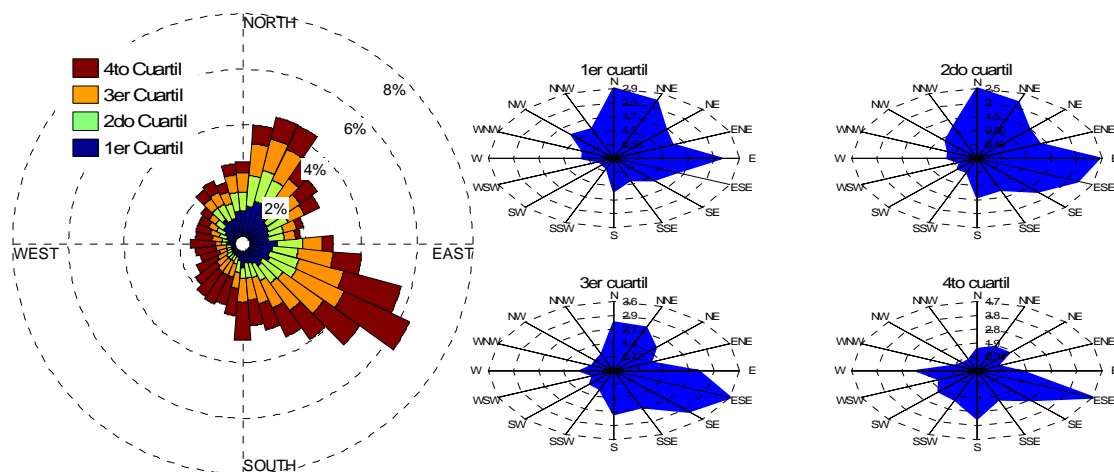


Figura 10.- Rosas de viento. Estación Carrasco. Serie original

Se observa que los vientos del cuadrante E-S son los que presentan una mayor frecuencia de ocurrencia, en particular los que provienen de la dirección SE y ESE. El cuadrante que le sigue en términos de frecuencia de ocurrencia es el N-E, con una frecuencia de ocurrencia alta de la dirección NNE. Sin embargo, los vientos de este cuadrante presentan bajas intensidades, predominando en las rosas del primer y segundo cuartil y apenas apareciendo en la rosa del cuartil superior. Lo opuesto sucede con los vientos del cuadrante S-W que apenas aparecen en las rosas de los tres primeros cuartiles y ocupan gran parte de la rosa del cuartil superior. Finalmente, los vientos que provienen del cuadrante W-N presentan una baja frecuencia de ocurrencia y baja intensidad.

En la Figura 11 y Figura 12 se presentan los resultados del análisis de la variación estacional realizado a partir de la serie de vientos registrados en la estación Carrasco.

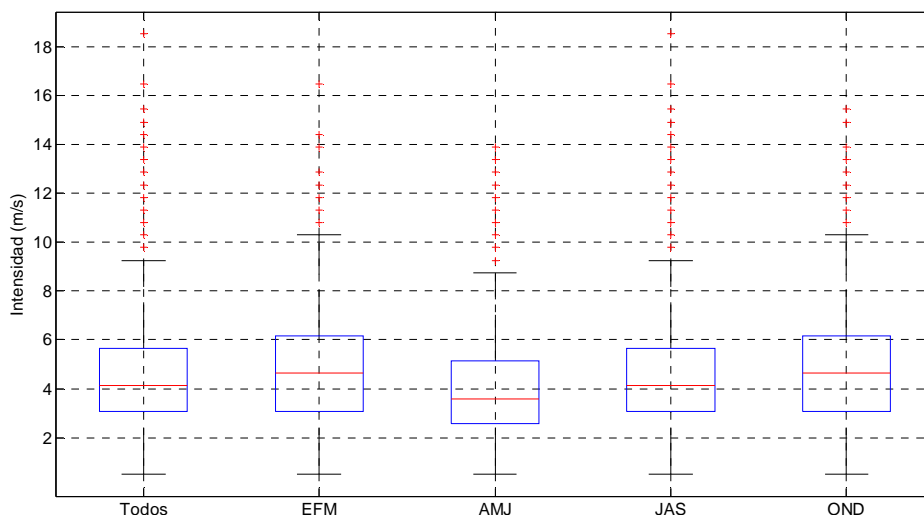


Figura 11.- Diagrama de cajas. Variación estacional de la intensidad del viento. Estación Carrasco

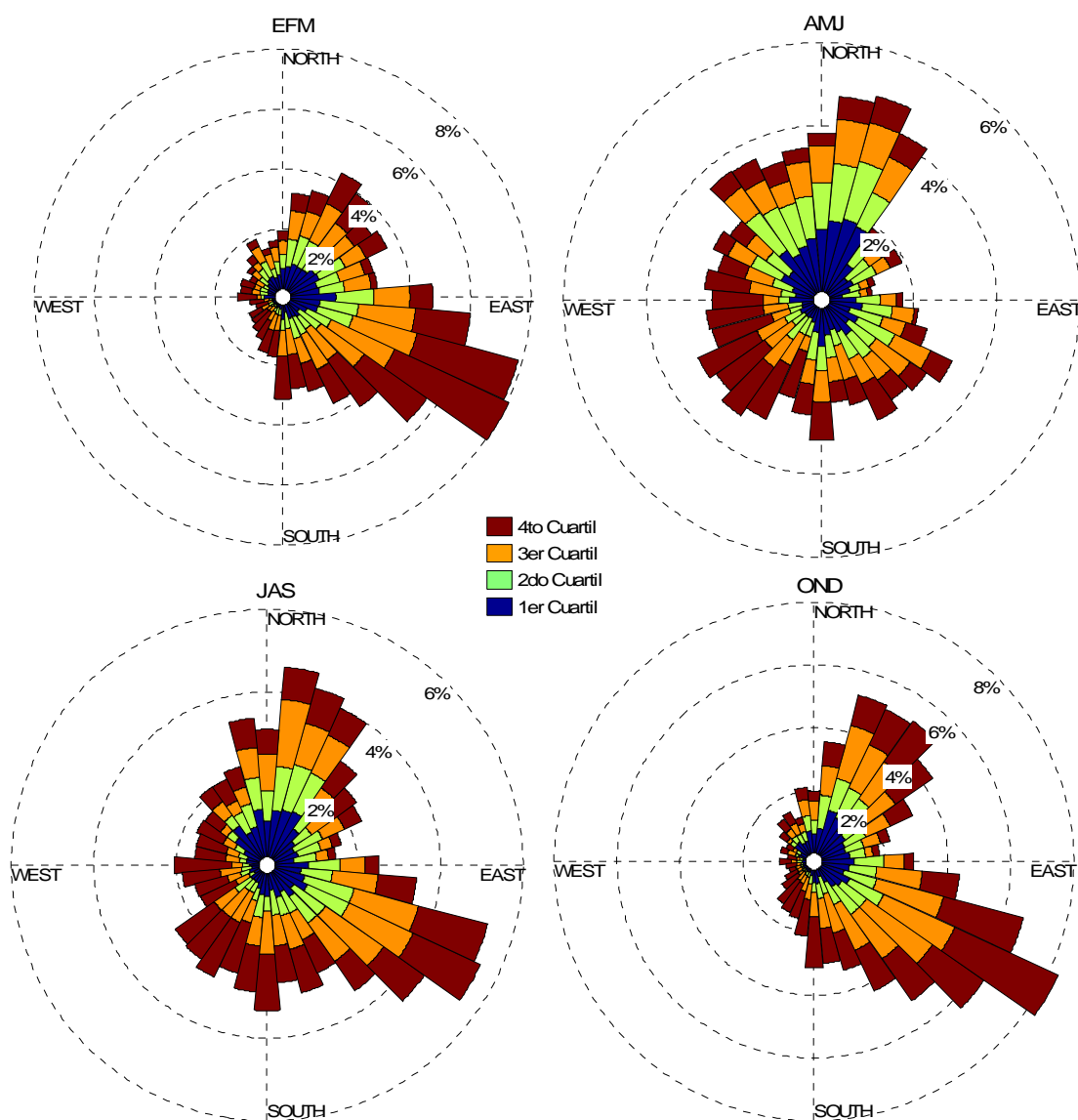


Figura 12.-Rosas de viento. Variación estacional. Estación Carrasco

Se observa que la estación del año en que se registran mayores intensidades de viento es la primavera (OND), seguida por el verano (EFM). En estas estaciones el viento proviene mayoritariamente desde el sureste, teniendo las direcciones del cuadrante N-E una probabilidad de ocurrencia también alta pero con intensidades más bajas. En otoño e invierno los vientos registrados presentan intensidades menores en términos medios, de entre los cuales los que presentan intensidades bajas provienen mayoritariamente de los cuadrantes norte y aquellos de intensidades más altas provienen del cuadrante S-W. Observaciones similares se obtuvieron al analizar la variación estacional del resto de las series consideradas. Estos resultados se presentan en el Anexo 1.

3.1.4.1.2 Punta Brava

En la Tabla 5, Figura 13 y Figura 14 se presentan las características de la serie de datos de viento registrados en Punta Brava.

Tabla 5.- Intensidad del viento (m/s). Parámetros de su distribución. Estación Punta Brava.

Promedio	Desviación estándar	q _{0.25}	Mediana (q _{0.5})	q _{0.75}	Máximo
5.83	2.85	3.60	5.14	7.2	20.57

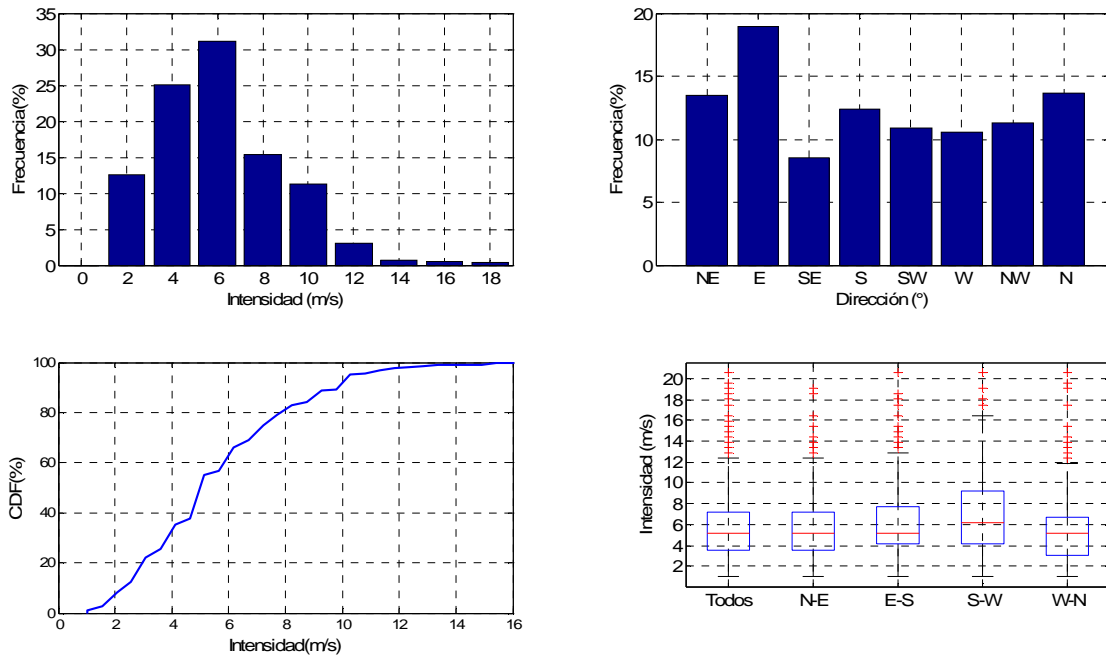


Figura 13.- Histogramas de intensidades y direcciones, distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades y diagrama de cajas discriminado por cuadrante. Punta Brava

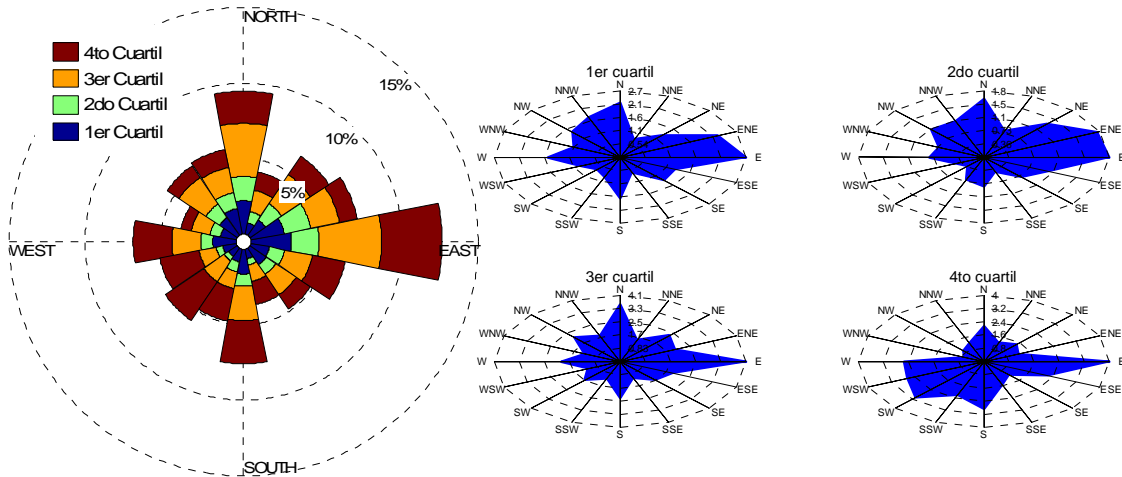


Figura 14.-Rosas de viento. Estación Punta Brava

Se observan intensidades mayores que las registradas en la estación Carrasco. Por otra parte, al igual que en Carrasco, se observa que los vientos que provienen de los cuadrantes sur presentan mayores intensidades que los que provienen de los cuadrantes norte, y que los vientos que provienen del suroeste, si bien tienen una baja frecuencia de ocurrencia para el total de los datos, representan gran parte de los vientos del cuartil superior.

La discontinuidad que presenta la rosa de vientos, mostrando una acumulación de datos en las direcciones E, S, W y N generan sospechas de que la medida de la dirección se encuentre sesgada a dichas direcciones.

3.1.4.1.3 Pontón de Recalada

En la Tabla 6, Figura 15 y Figura 16 se presentan las características del viento registrado en Pontón de Recalada.

Tabla 6.- Intensidad del viento (m/s). Parámetros de su distribución. Pontón de Recalada

Promedio	Desviación estándar	q _{0.25}	Mediana (q _{0.5})	q _{0.75}	Máximo
8.02	4.36	4.63	7.72	10.29	46.3

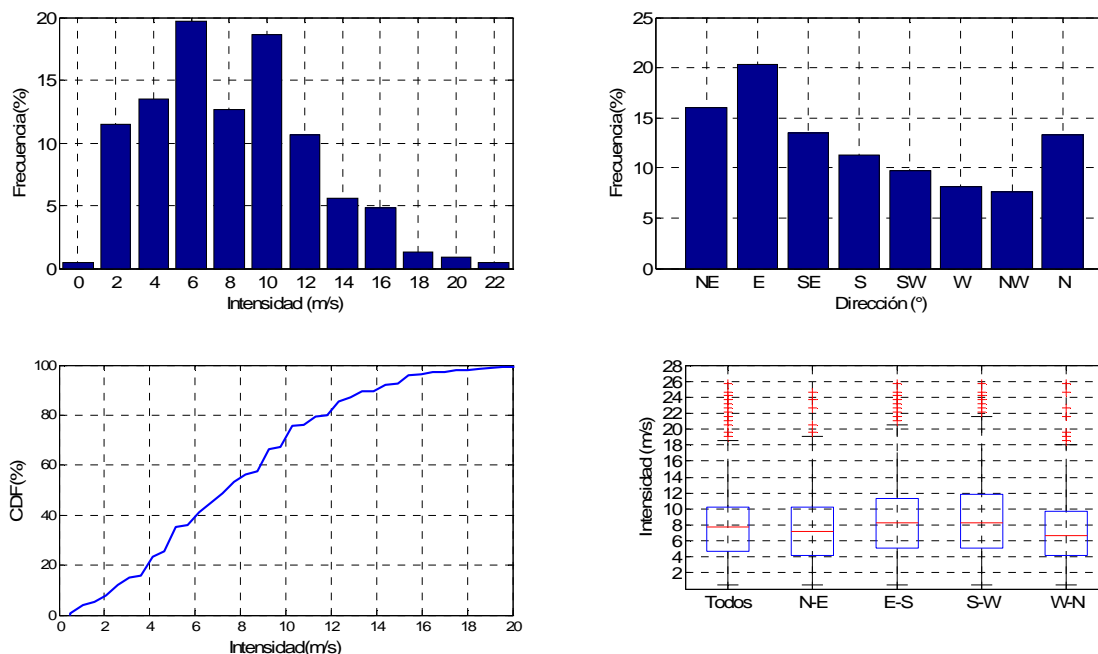


Figura 15.- Histogramas de intensidades y direcciones, distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades y diagrama de cajas discriminado por cuadrante. Pontón de Recalada

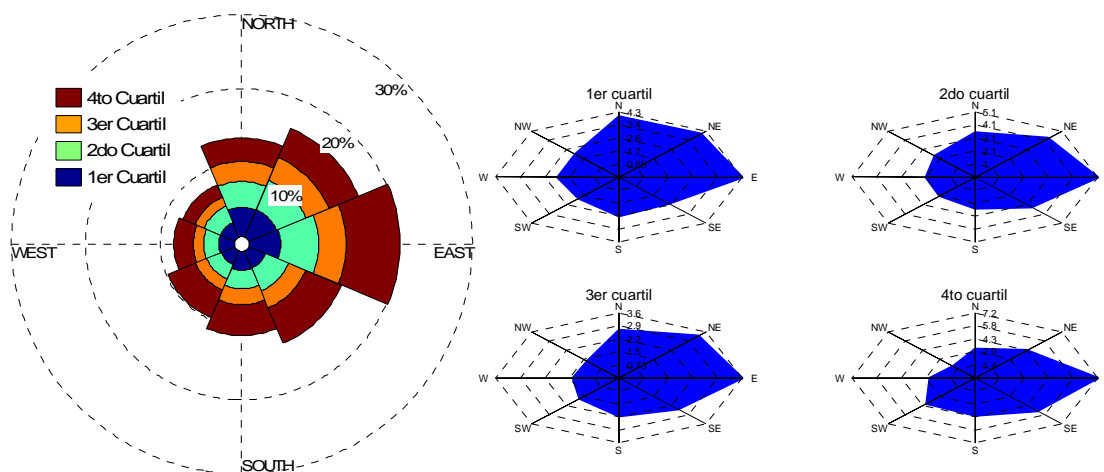


Figura 16.- Rosas de viento. Pontón de Recalada

Se observan vientos de mayor intensidad que en el resto de las estaciones analizadas. La forma del histograma de intensidades con un hueco en la banda de los 8 m/s es inusual, posiblemente en algún período dentro de la serie analizada se presentó algún inconveniente en el registro de los datos en dicho rango de intensidades.

3.1.4.1.4 Pilote Norden

En la Tabla 7, Figura 17 y Figura 18 se presentan las características del viento registrados en Pilote Norden.

Tabla 7.- Intensidad del viento (m/s). Parámetros de su distribución. Pilote Norden

Promedio	Desviación estándar	q _{0.25}	Mediana (q _{0.5})	q _{0.75}	Máximo
6.4	3.05	4.19	6.22	8.43	

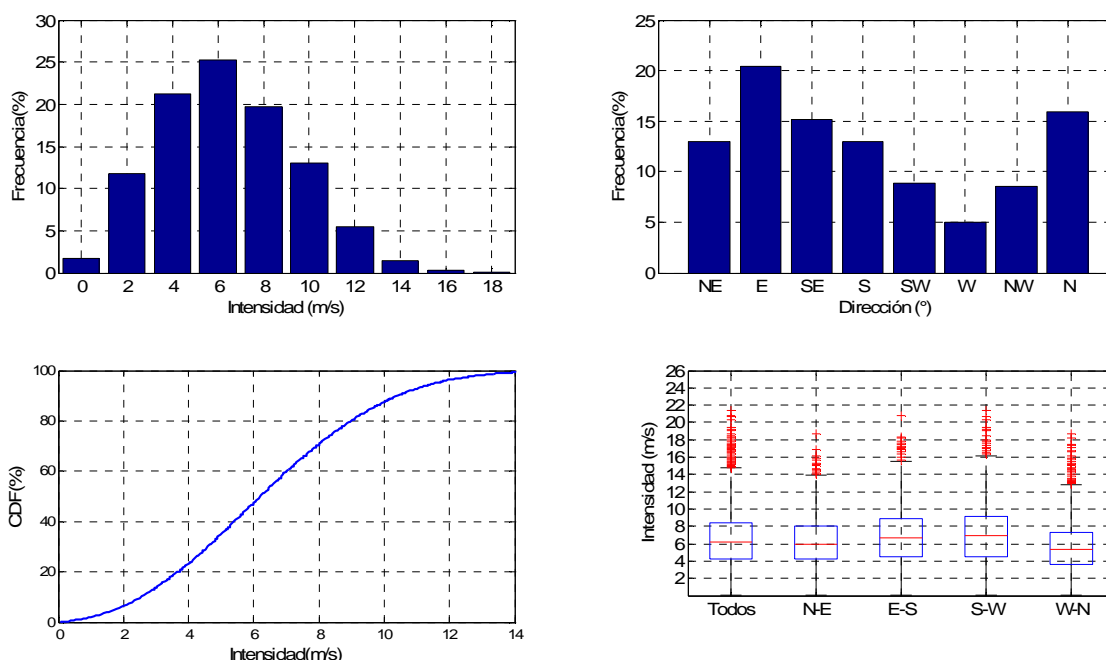


Figura 17.- Clima de vientos. Pilote Norden

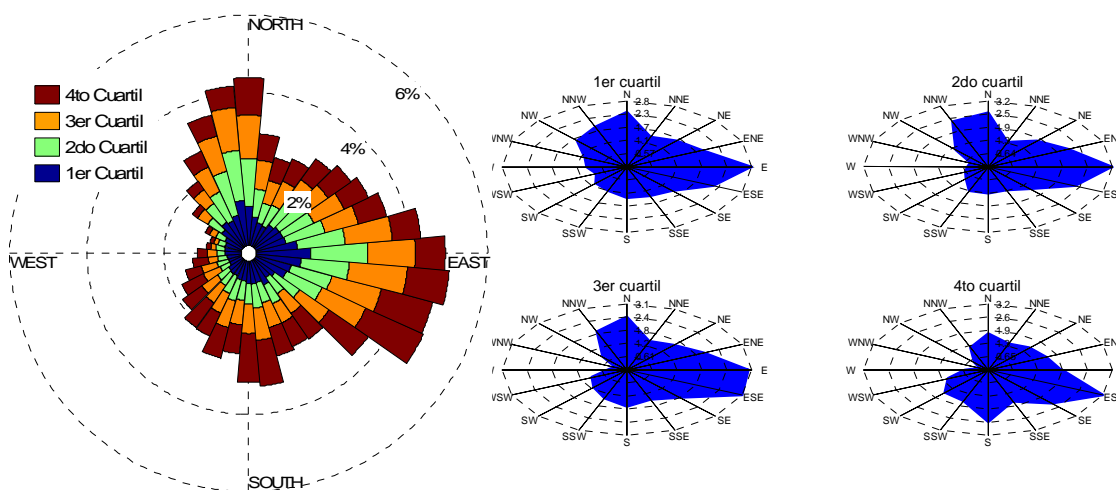


Figura 18.- Rosas de vientos. Pilote Norden

Se observan mayores intensidades de viento que en Carrasco y Punta Brava, pero menores que en Pontón de Recalada. Al igual, que en Carrasco, se observa que para los vientos de los cuartiles superiores predominan los cuadrantes sur (E-S y S-W) mientras que para los vientos de los cuartiles inferiores tienen un mayor peso los vientos de los cuadrantes norte (N-W y N-E).

3.1.4.1.5 Resumen del análisis exploratorio de las series de datos medidos

- Las mayores intensidades fueron registradas en Pontón de Recalada, luego en Pilote Norden, seguido por Punta Brava y finalmente Carrasco.
- En todas las series analizadas se observó que los vientos que provienen del cuadrante S-W son los que presentan mayores intensidades, seguidos por los que provienen del cuadrante E-S, luego por los que provienen del cuadrante N-E y finalmente los que presentan menores intensidades son los que provienen del cuadrante W-N.
- Las direcciones con mayor frecuencia de ocurrencia pertenecen a los cuadrantes E-S y N-E.
- Los vientos cuyas intensidades están comprendidas en los cuartiles inferiores provienen mayoritariamente de los cuadrantes norte (N-E y W-N).
- Los vientos cuyas intensidades están comprendidas en los cuartiles superiores provienen mayoritariamente de los cuadrantes sur (E-S y S-W).
- Los vientos de dirección SW presentan una baja frecuencia de ocurrencia pero adquieren mayor peso en la rosa correspondiente al cuartil superior de intensidades.
- La estación del año en que se registran mayores intensidades de viento es la primavera (OND), seguida por el verano (EFM), luego el invierno (JAS) y finalmente el otoño (AMJ).
- En primavera y verano los vientos provienen mayoritariamente de los cuadrantes E-S y N-E mientras que en otoño e invierno los vientos que provienen de los otros dos cuadrantes adquieren mayor peso.

3.1.4.1.6 Reanálisis NCEP-CFSR. Región 38S – 32S 60W – 52 W

En la Figura 19 se presenta el campo de intensidades medias.

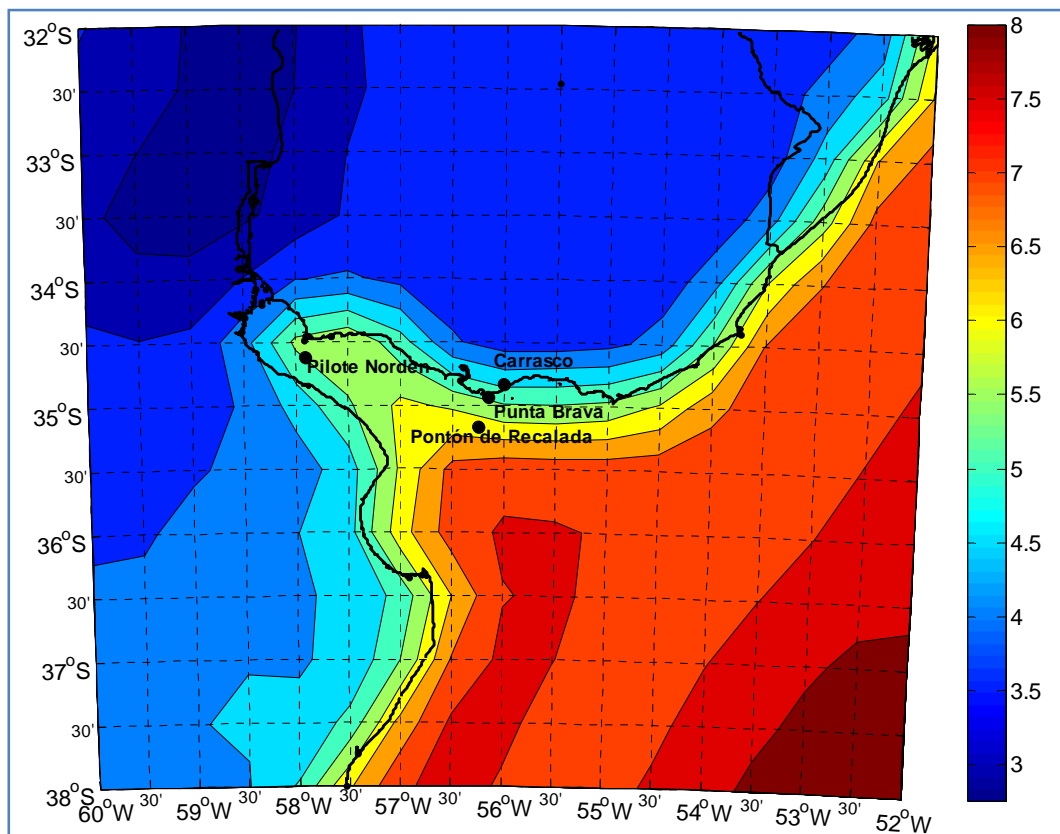


Figura 19.- Campo de intensidad media del viento. Reanálisis NCEP-CFSR

Se observa que los valores de intensidad media obtenidos sobre el mar son significativamente más altos que los obtenidos sobre el continente. Se aprecia un fuerte gradiente que involucra a aquellos puntos de grilla que están en el continente pero tienen puntos vecinos en el mar o bien están en el mar y tienen puntos vecinos¹³ en el continente. Por lo tanto, los puntos que se encuentran enteramente en el mar o enteramente en el continente (puntos vecinos enteramente en el mar o enteramente en el continente) están por fuera de la zona de fuerte gradiente. Se hace notar que los puntos en los que se analizaron los datos medidos se encuentran todos en la zona de fuerte gradiente.

En la Figura 20 se presenta el campo medio obtenido para la componente zonal (U) y para la componente meridional (V).

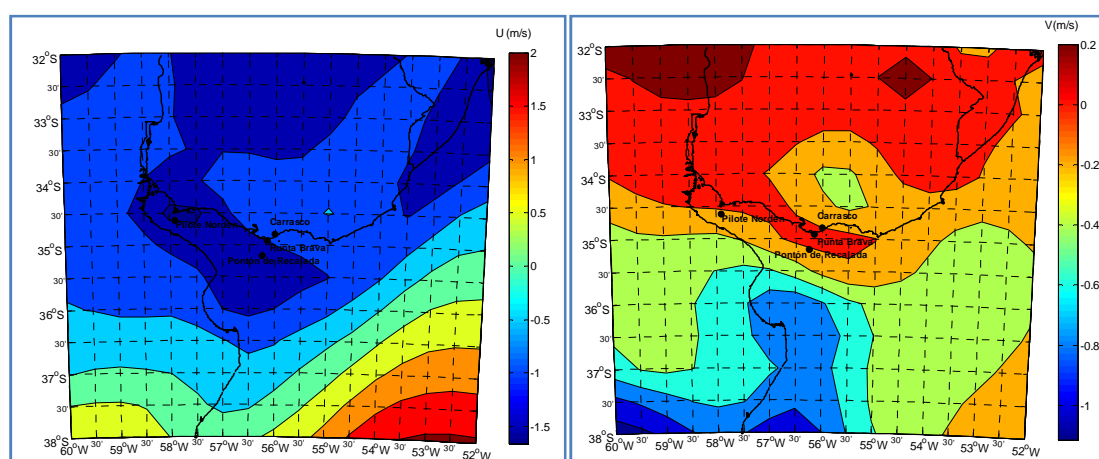


Figura 20.- Campo medio de la componente zonal U (izquierda) y de la componente meridional V (derecha). Reanálisis NCEP-CFSR.

Se observa que en la zona donde se encuentran las estaciones analizadas, el valor medio de U es claramente negativo mientras que el valor medio de V es próximo a cero, siendo positivo en Carrasco y Punta Brava pero negativo en Pontón de Recalada y Piloté Norden. El valor medio de U negativo es consistente con la observación de que las direcciones con mayor frecuencia de ocurrencia pertenecen a los cuadrantes E-S y N-E.

En la Figura 21 se presentan las rosas de viento correspondientes a nueve puntos que cubren toda la región analizada. Las coordenadas de los puntos son: 37S-59W, 37S-56W, 37S-53W, 35S-59W, 35S-56W, 35S-53W, 33S-59W, 33S-56W y 33S-53W.

¹³ Punto de grilla contiguo, ya sea en la dirección horizontal, vertical o en diagonal

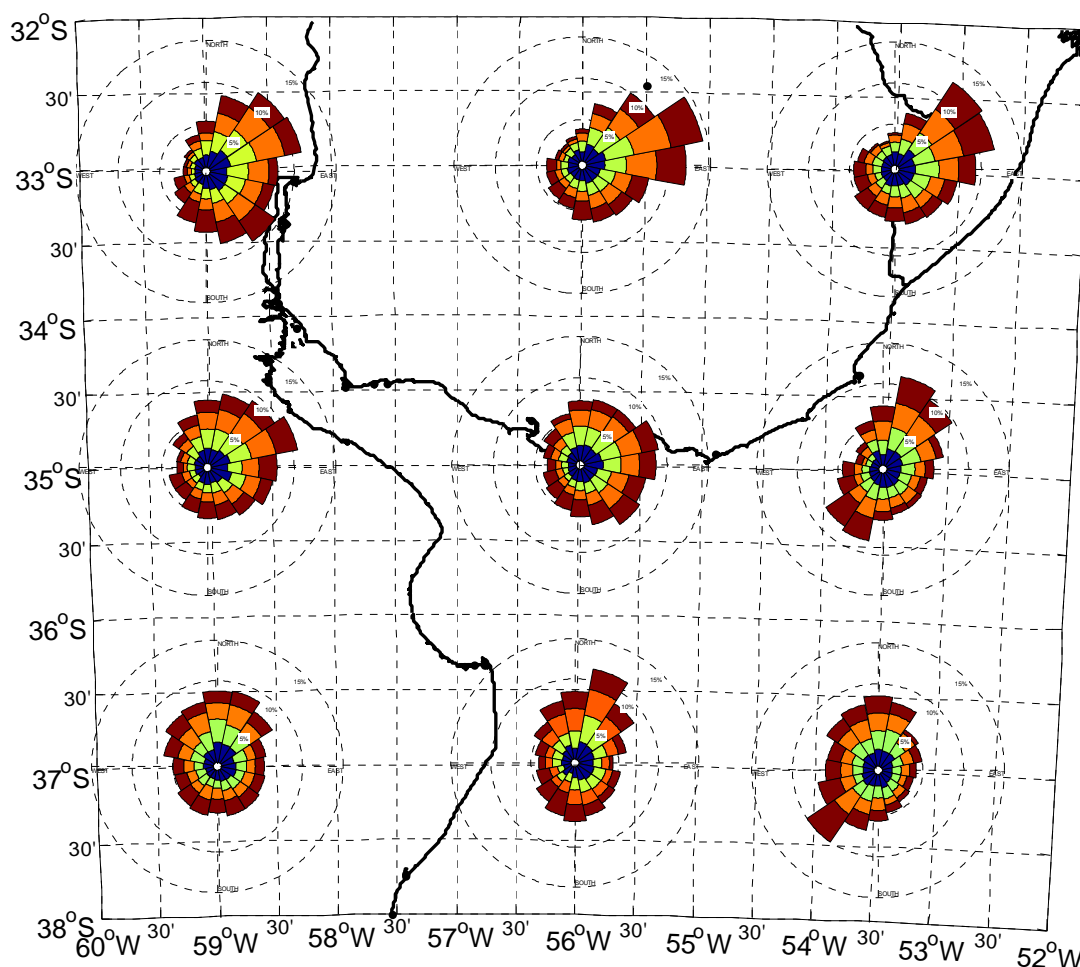


Figura 21.- Rosas de viento. Reanálisis NCEP – CFSR

Se observa un comportamiento similar entre la rosa de viento correspondiente a las coordenadas 35S-56W (punto cercano a las estaciones analizadas) y las rosas de vientos correspondientes a los datos medidos. Este comportamiento se caracteriza por un predominio de los vientos del cuadrante E-S y N-E, y por un predominio en lo que respecta al cuartil superior de los vientos que provienen del cuadrante S-W y E-S.

3.1.4.2 Análisis comparativo

3.1.4.2.1 Carrasco corregidos vs. Reanálisis 35 S-56W

Se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre la serie de datos medidos en la estación Carrasco con la serie correspondiente al punto de grilla 35S-56W del reanálisis NCEP-CFSR. Los datos de Carrasco se corrigieron a los efectos de trasladar los datos medidos al mar, lo que implicó multiplicar las intensidades por un factor de 1.18. Este coeficiente contempla la diferencia de rugosidad entre el mar y la zona donde se emplaza la estación meteorológica y fue obtenido de las Recomendaciones para Obras Marítimas de Puertos del Estado de España.

En el Anexo 2 se presenta la comparación de la serie de datos medidos en Carrasco sin realizar la corrección con una serie que surge de interpolar linealmente por componentes los puntos de grilla 34.5S-56W y 35S-56W.

3.1.4.2.1.1 Comparación de climas

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 22, Figura 23 y Figura 24

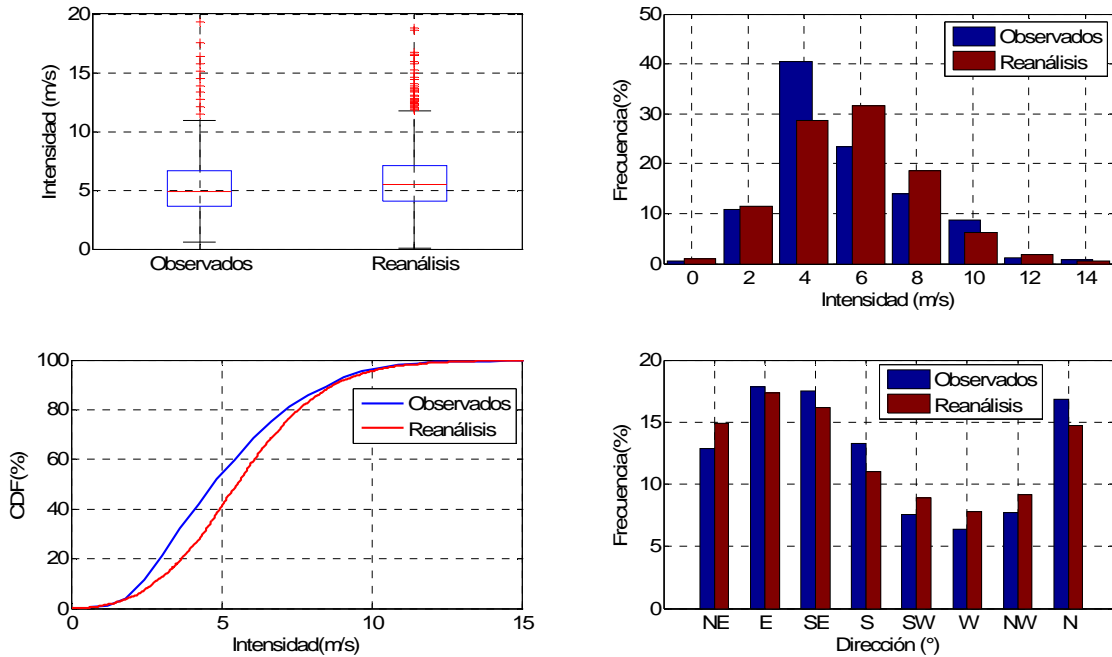


Figura 22.- Histogramas de intensidades y direcciones, diagrama de caja de intensidades y distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades. Carrasco corregido vs NCEP-CFSR 35S-56W.

Los datos de reanálisis no registran eventos de calma, por lo tanto las series comparadas no incluyen los eventos de calma registrados en la estación Carrasco. Los datos del reanálisis que coinciden con calmas en Carrasco fueron analizados y los resultados obtenidos se presentan en el Anexo 3.

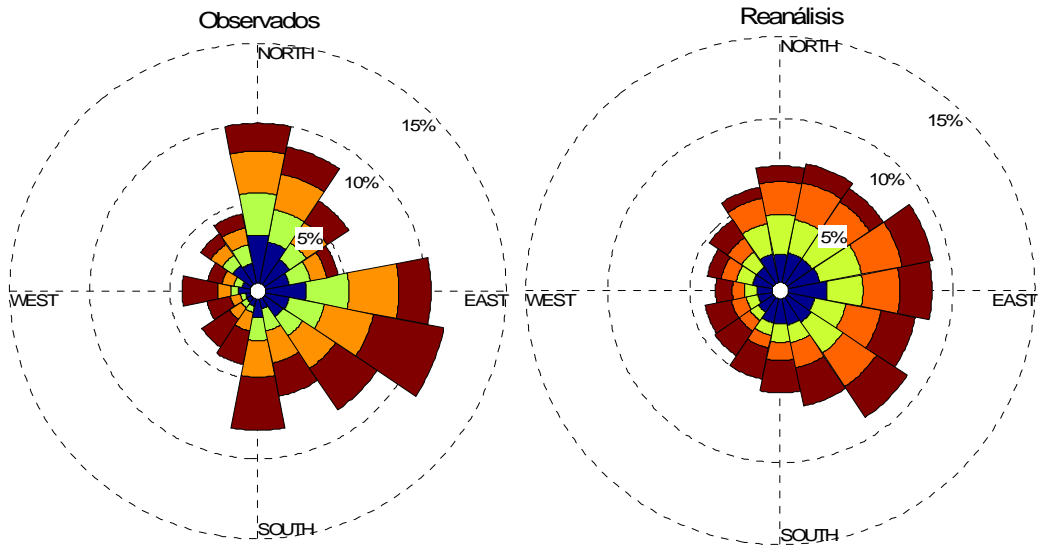


Figura 23.- Rosas de viento. Carrasco corregido vs NCEP-CFSR 35S-56W.

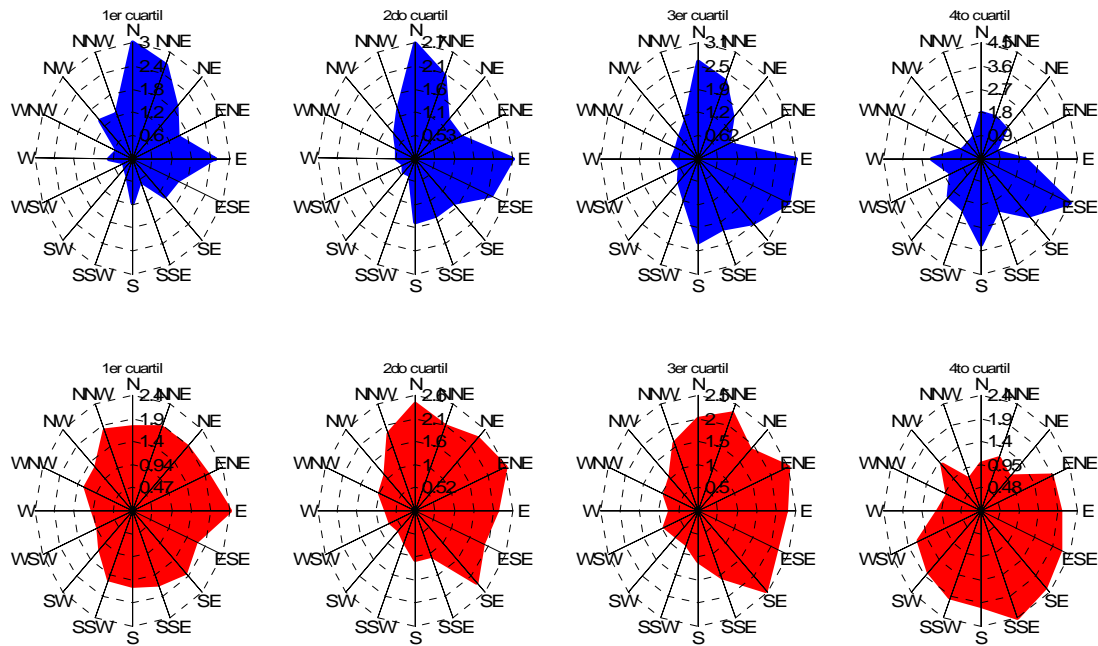


Figura 24.- Rosas de viento discriminadas por cuantiles. Carrasco corregido (Azul) vs NCEP-CFSR 35S-56W (Rojo).

Se observa una similitud entre los climas obtenidos a partir de los datos medidos en Carrasco corregidos para trasladar al mar y a partir de los datos de reanálisis. Si bien se aprecian algunas diferencias, las observaciones principales vertidas en el apartado 3.1.4.1.5, en general son también válidas para el clima generado a partir de los datos de reanálisis.

3.1.4.2.1.2 Comparación visual de las series

Los gráficos de la Figura 25 y Figura 26 permiten comparar visualmente las series. En el caso de la intensidad y dirección en función del tiempo, se presenta un período arbitrario de dos meses para facilitar la visualización del gráfico.

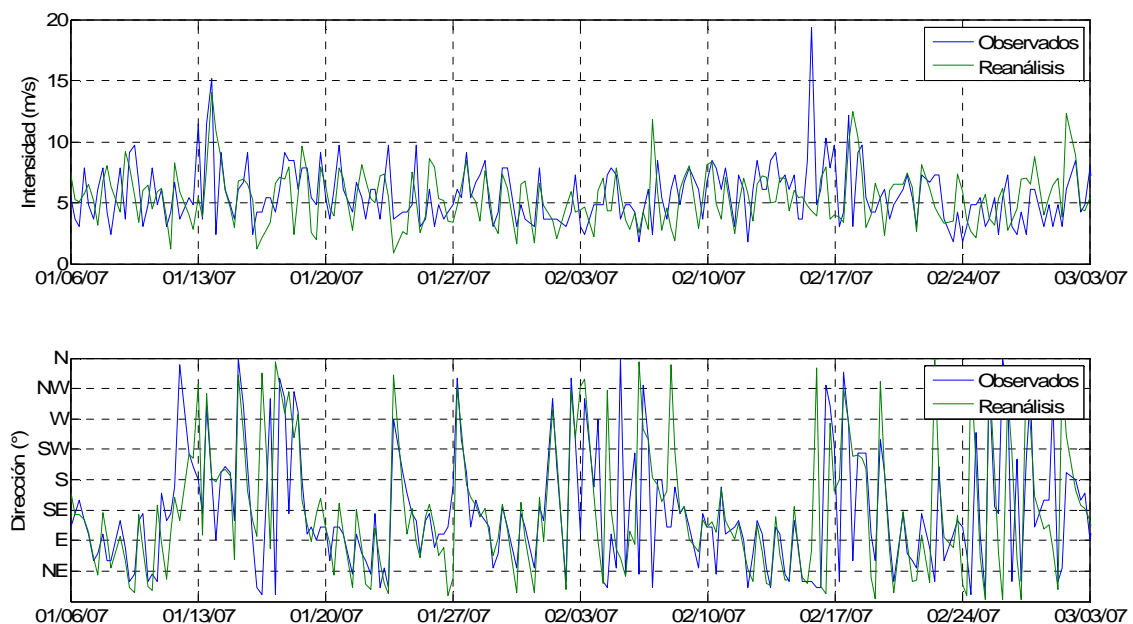


Figura 25.-Serie temporal de intensidad y dirección. Carrasco corregido (Observados) y reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W

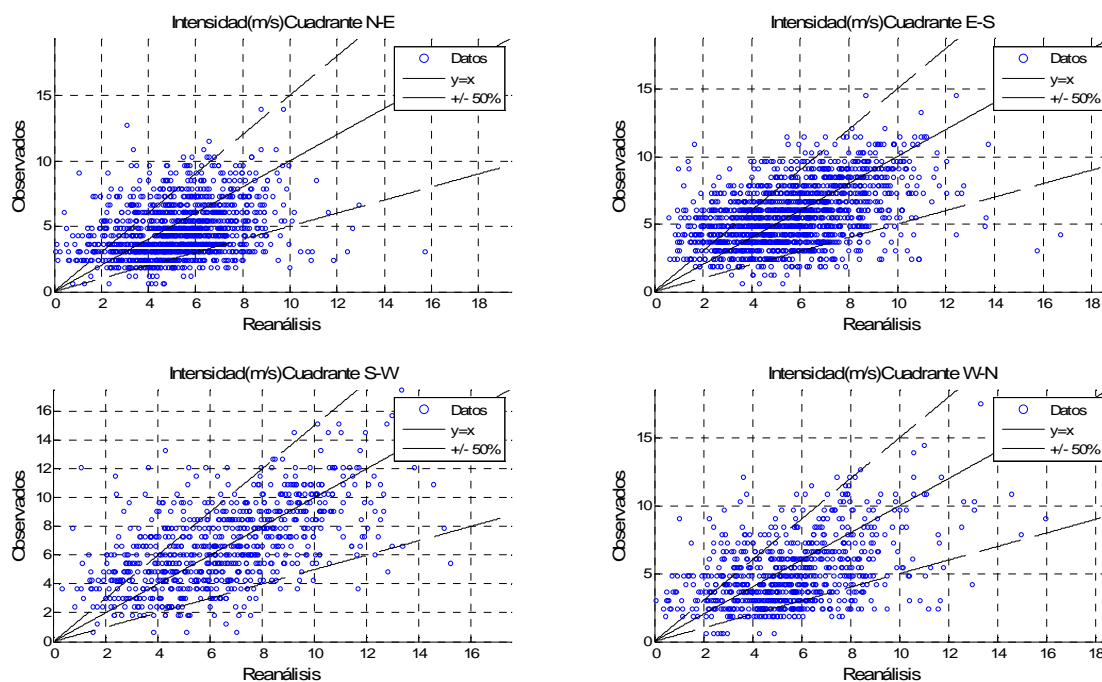


Figura 26.- Diagramas de dispersión de intensidades de viento discriminadas por cuadrante. Carrasco corregido (Observados) vs reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W

3.1.4.2.1.3 Estadísticos de verificación continua

En la Tabla 8 y la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos de calcular los distintos estadísticos de verificación continua considerando los datos en Carrasco corregidos como los datos observados y los datos de reanálisis en el punto de grilla 35S-56W como los datos estimados.

Tabla 8.- Estadísticos de verificación continua. Intensidad del viento. Carrasco corregido (Observados) vs reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

	EM(m/s)	MAE (m/s)	RMSE(m/s)	LEPS	r	SSP	SSC
Todos	0.26	1.94	2.49	0.23	0.49	0.16	0.28
Cuadrante N-E	0.66	1.96	2.50	0.26	0.29		
Cuadrante E-S	0.04	1.83	2.37	0.23	0.48		
Cuadrante S-W	-0.17	2.03	2.61	0.21	0.57		
Cuadrante W-N	0.60	2.11	2.66	0.24	0.49		

Tabla 9.- Estadísticos de verificación continua. Dirección del viento. Carrasco corregidos (Observados) vs reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

MAE (°)	SSP
34.3	0.31

Se observa que tanto la intensidad como la dirección se representan mejor por el reanálisis que por un estimador basado en la persistencia. En ambos casos se obtuvieron SSP mayores que cero. Se obtuvo que los vientos provenientes del cuadrante S-W son los que mejor representa el reanálisis y los que provienen del cuadrante N-E son los peor representados.

3.1.4.2.1.4 Estadísticos de verificación categórica

En la Figura 27 y en la Figura 28 se presentan los resultados de calcular los estadísticos de verificación categórica para la intensidad y dirección del viento respectivamente.

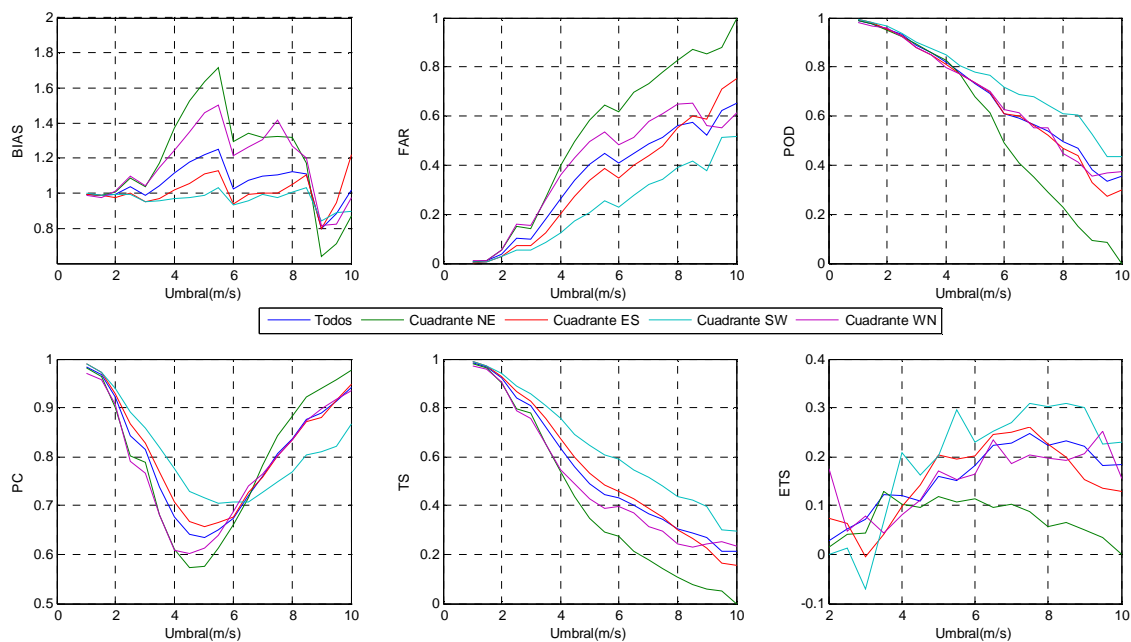


Figura 27.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Carrasco corregido (Observados) vs reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

Los resultados más favorables fueron obtenidos para los vientos que provienen del cuadrante S-W, mientras que la peor representación se obtuvo para los vientos del cuadrante N-E.

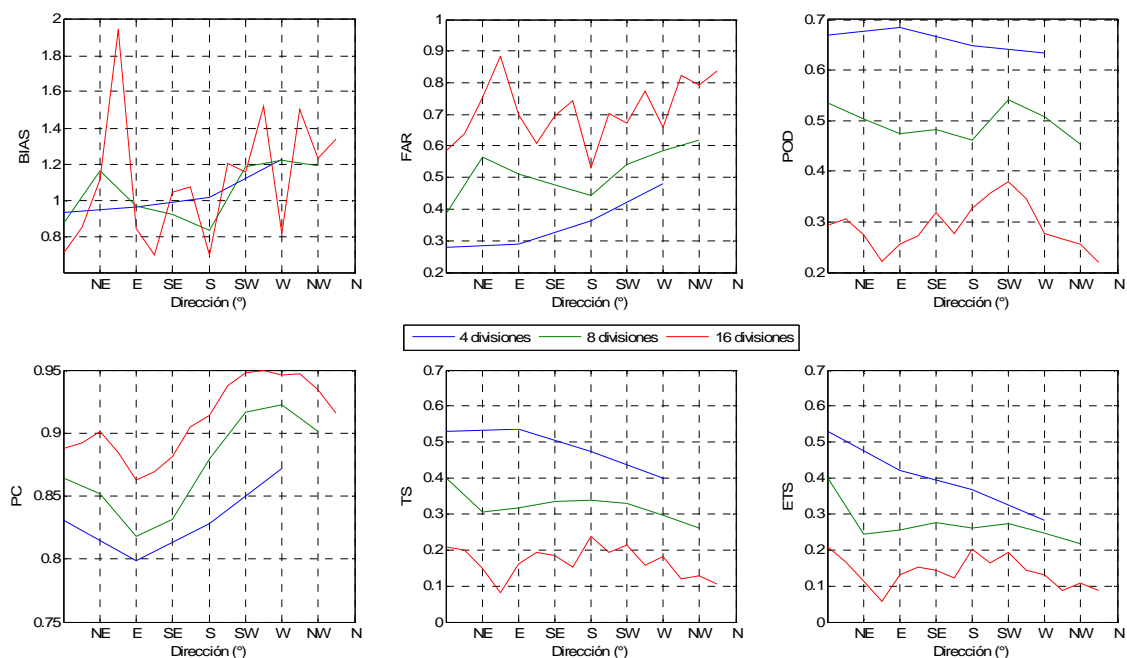


Figura 28.-Estadísticos de verificación categórica. Dirección del viento. Carrasco corregido (Observados) vs reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de calcular el indicador de habilidad de Heidke para distintas combinaciones de rangos de intensidades y rangos de direcciones.

Tabla 10.- Indicador de habilidad de Heidke. Carrasco corregido (Observados) vs Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

Rango intensidades	División direcciones		
	4	8	16
1 m/s	0.08	0.07	0.04
2 m/s	0.16	0.13	0.08
4 m/s	0.28	0.23	0.14

3.1.4.2.2 Boya Oceanográfica vs. Reanálisis 35.5S-56.5W

En una primera instancia se realizó la comparación de los datos medidos por la boya con una serie obtenida de interpolar bilinealmente por componentes los 4 puntos de la grilla del reanálisis que rodean a la boya oceanográfica (35.5S-56.5W, 35.5S-56W, 35S-56.5W y 35S-56W). Los resultados obtenidos en este análisis inicial se presentan en el Anexo 4. Se puede apreciar que los datos medidos son ampliamente subestimados por los datos de reanálisis interpolados. Considerando que, por su localización, es esperable que el clima de vientos en la boya presente características típicamente marítimas, se realizaron nuevas comparaciones con los puntos de grilla cercanos que estuvieran enteramente en el mar. En este apartado se presenta la comparación con la serie correspondiente al punto 56W-35.5S, pero también se realizó la comparación con el punto 35.5S-56W, obteniéndose resultados muy similares.

3.1.4.2.2.1 Comparación de climas

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 29, Figura 30 y Figura 31

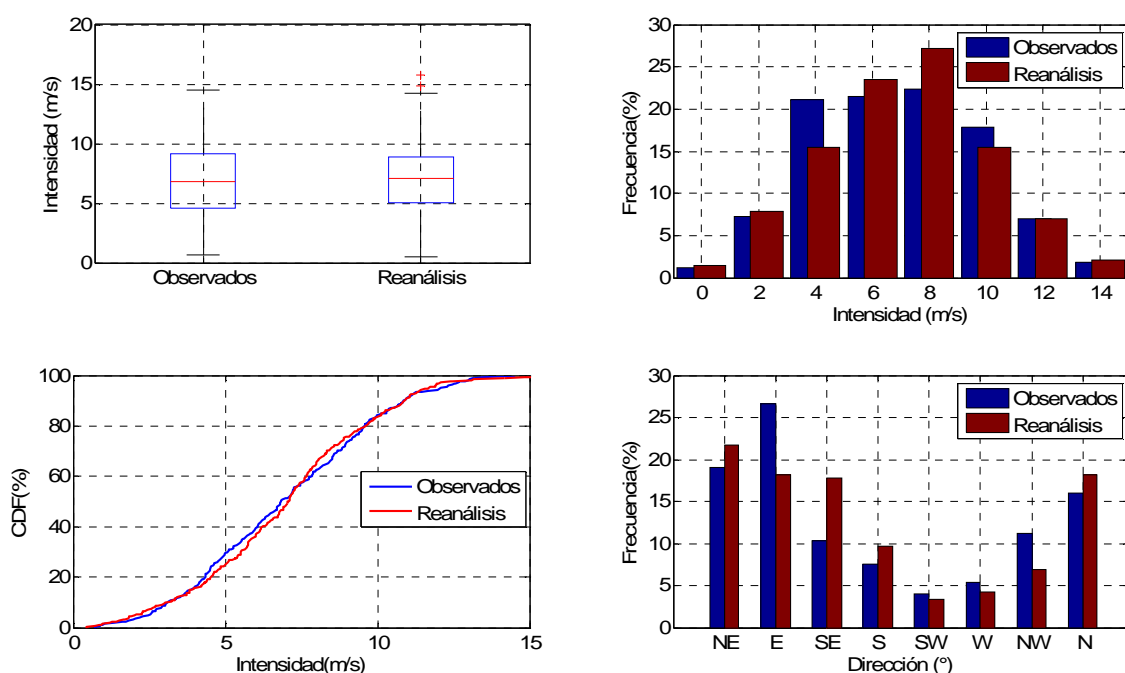


Figura 29.- Histogramas de intensidades y direcciones, diagrama de caja de intensidades y distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades. Boya oceanográfica vs NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

Los diagramas de cajas, los histogramas de intensidades y las curvas de las distribuciones empíricas de frecuencias acumuladas muestran una gran similitud. Mientras que los histogramas de direcciones muestran algunas diferencias, fundamentalmente en las direcciones E y SE.

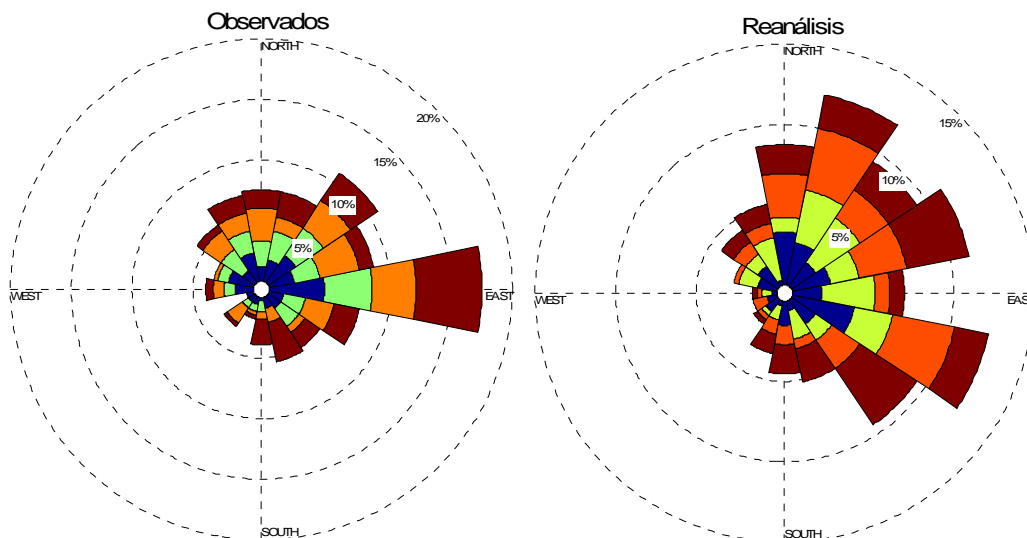


Figura 30.- Rosas de viento. Boya oceanográfica vs NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

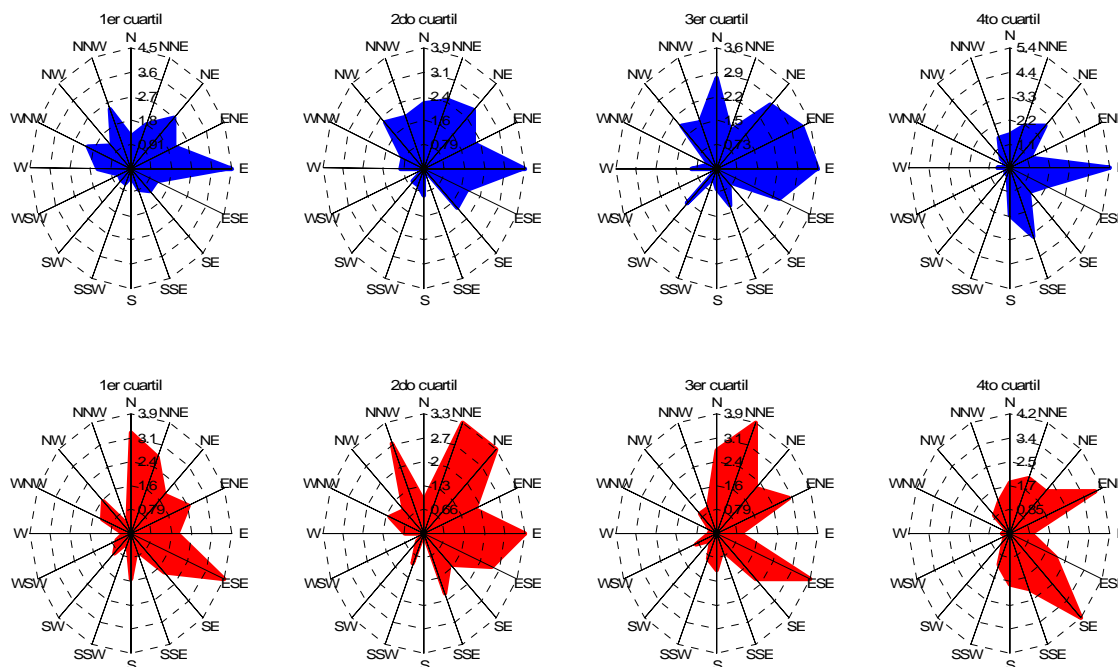


Figura 31.- Rosas de viento discriminadas por cuartiles. Boya oceanográfica (Azul) vs NCEP-CFSR 35.5S-56.5W (Rojo).

Las rosas de vientos también manifiestan las diferencias observadas en los histogramas de direcciones. La dirección este es la que presenta mayor frecuencia de ocurrencia en los datos observados, mientras que en los datos de reanálisis, su frecuencia de ocurrencia es baja. Sin embargo, las direcciones contiguas (ESE y ENE) son de las que presentan mayor frecuencia de ocurrencia en el reanálisis. Es esperable que muchos de los datos observados de dirección este se correspondan con datos del reanálisis de las direcciones contiguas ESE o ENE. Las rosas discriminadas por cuartiles presentan configuraciones similares y en ellas también se observa que es probable que los datos observados de dirección este en el reanálisis se correspondan con datos de direcciones contiguas.

3.1.4.2.2 Comparación visual de las series

En la Figura 32 se muestran superpuestos los datos observados y los datos de reanálisis. En la Figura 33 se muestra la comparación mediante un diagrama de dispersión.

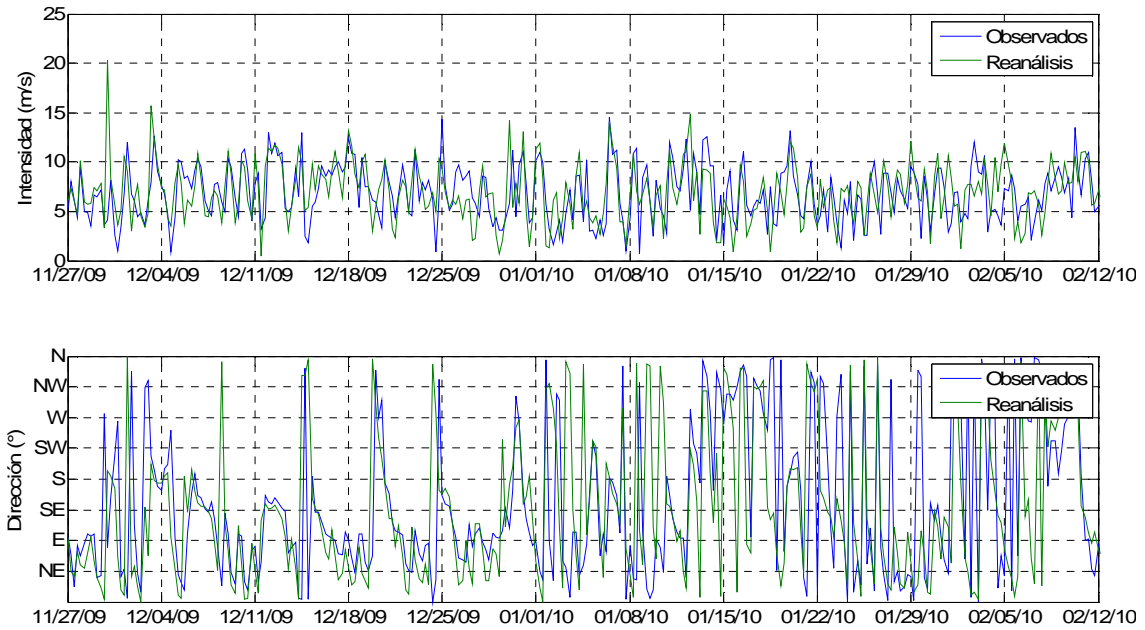


Figura 32.-Serie temporal de intensidad y dirección.
Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

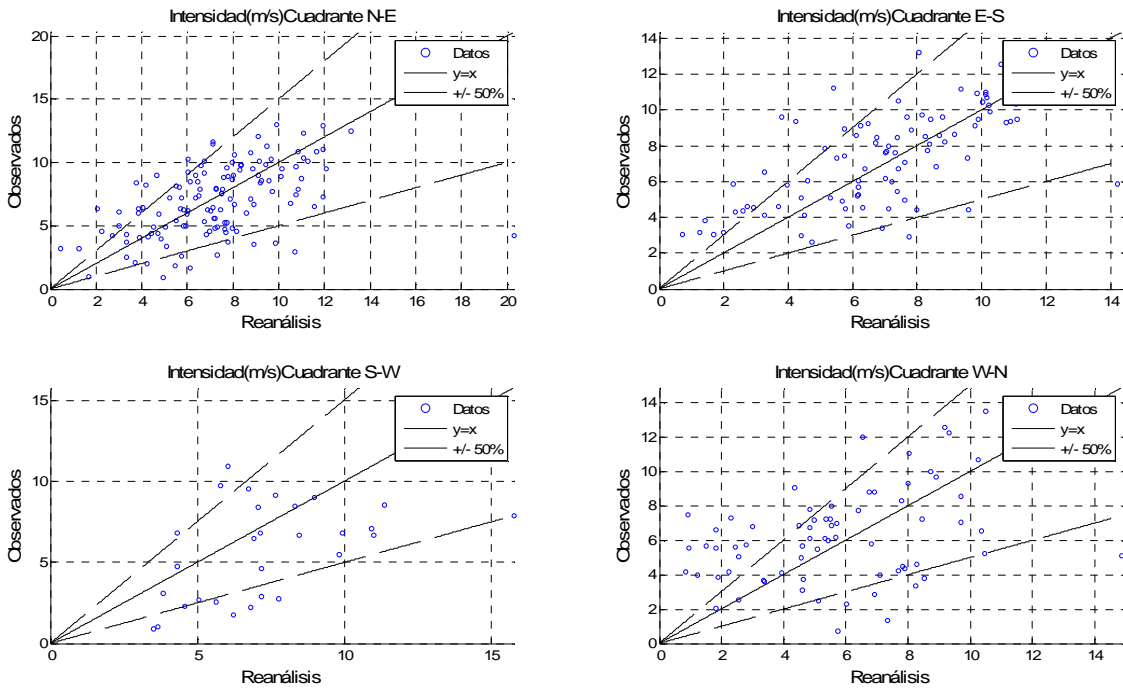


Figura 33.- Diagramas de dispersión de intensidades de viento discriminadas por cuadrante.
Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

Se observa que la serie de reanálisis acompaña las variaciones observadas en la serie de datos medidos y no se aprecian grandes diferencias entre las magnitudes de una y otra serie.

3.1.4.2.2.3 Estadísticos de verificación continua

En la Tabla 11 y la Tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de calcular los distintos estadísticos de verificación continua considerando los datos medidos por la boya oceanográfica como los datos observados y los datos de reanálisis en el punto de grilla 56W-35.5S como los datos estimados.

Tabla 11.- Estadísticos de verificación continua. Intensidad del viento. Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

	EM(m/s)	MAE (m/s)	RMSE(m/s)	LEPS	r	SSP	SSC
Todos	0.04	2.11	2.77	0.20	0.56	0.2	0.37
Cuadrante N-E	0.26	2.05	2.80	0.20	0.50		
Cuadrante E-S	-0.33	1.65	2.22	0.15	0.72		
Cuadrante S-W	1.37	2.59	3.16	0.21	0.64		
Cuadrante W-N	-0.44	2.58	3.16	0.28	0.36		

Tabla 12.- Estadísticos de verificación continua. Dirección del viento. Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

	MAE (°)	SSP
	40.2	0.14

Se observa que la intensidad es mejor representada que la dirección pero para ambas variables los indicadores de habilidad (SSP, SSC) muestran que los datos de reanálisis representan mejor a los datos observados que lo que podría lograrse con estimadores basados en la persistencia o en la climatología. Los bajos valores de errores medios obtenidos muestran que no existe una tendencia clara a la sobre o subestimación de los datos observados por parte de los datos de reanálisis. Finalmente se destacan los altos coeficientes de correlación obtenidos para los vientos provenientes de los cuadrantes E-S y S-W.

3.1.4.2.2.4 Estadísticos de verificación categórica

En la Figura 34 y en la Figura 35 se presentan los resultados de calcular los estadísticos de verificación categórica para la intensidad y dirección del viento respectivamente.

Se destaca la buena representación de los vientos provenientes del cuadrante E-S (curvas rojas), puesta de manifiesto por los altos valores obtenidos de POD, PC, TS y ETS. Por el contrario los vientos provenientes del cuadrante W-N (curvas magentas) son los peores representados.

Los estadísticos de verificación categórica calculados para las direcciones mostraron resultados similares a los obtenidos al comparar los datos de la estación Carrasco. Una probabilidad de detección de la dirección del viento de aproximadamente 20%, para un rango de 22.5° (16 divisiones), de aproximadamente 50% para un rango de 45° (8 divisiones), y de 70 % para un rango de 90° (4 divisiones).

Procesamiento de datos

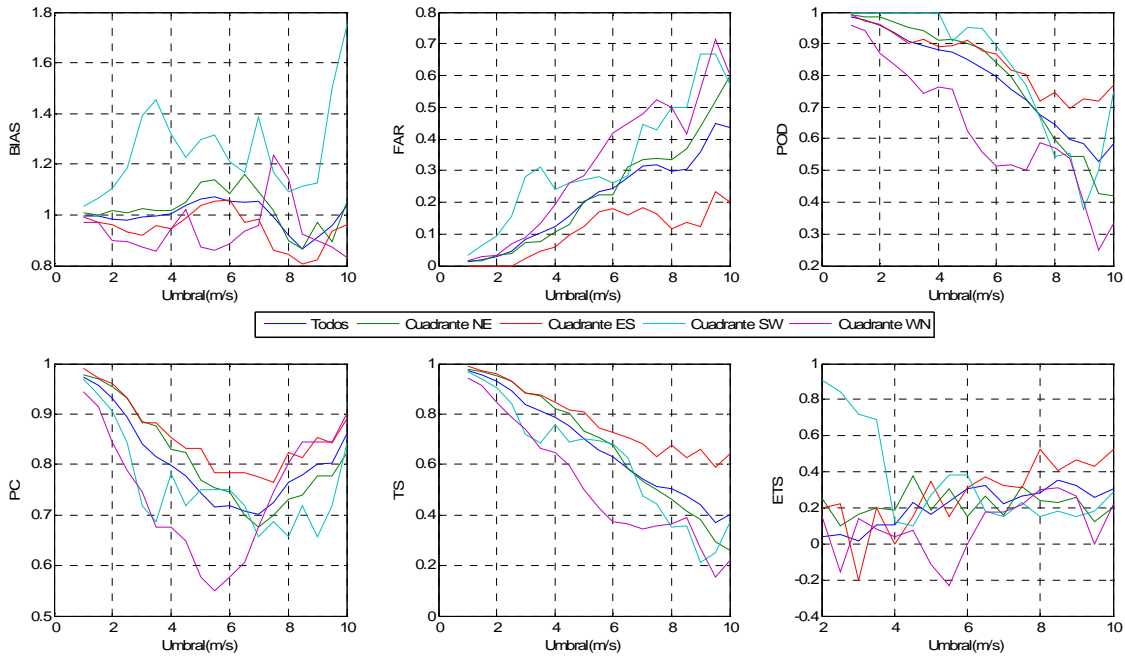


Figura 34.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

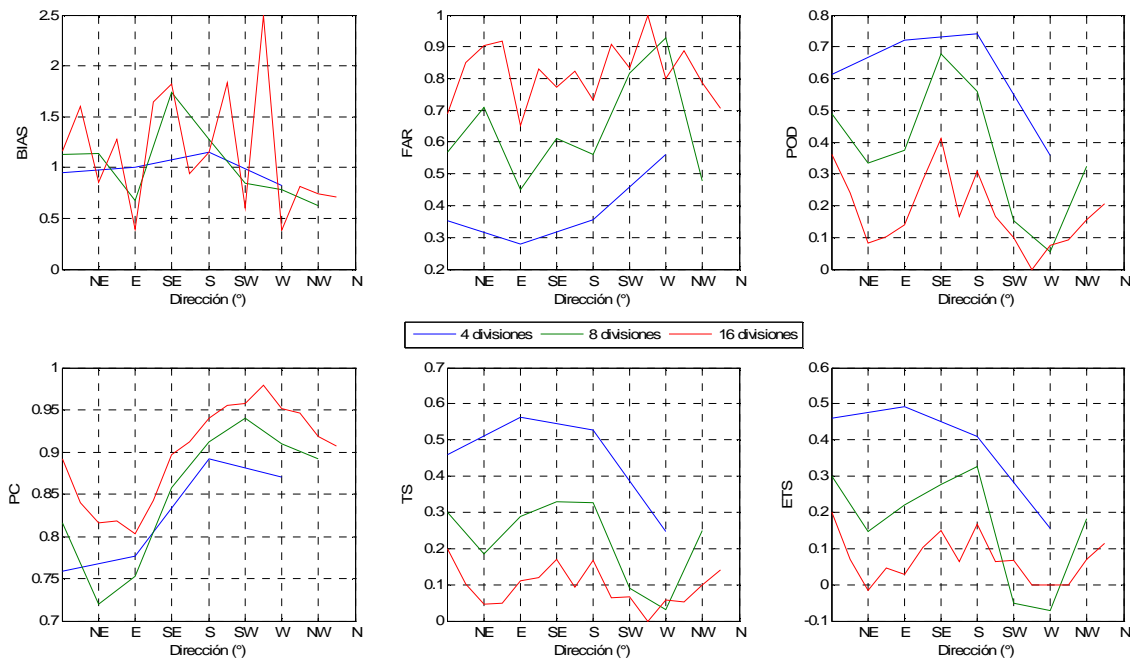


Figura 35.- Estadísticos de verificación categórica. Dirección del viento. Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W.

En la Tabla 13 se presentan los resultados obtenidos de calcular el Indicador de habilidad de Heidke para distintas combinaciones de rangos de intensidades y rangos de direcciones.

Tabla 13.- Indicador de habilidad de Heidke. Boya oceanográfica (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56.5W

Rango intensidades	División direcciones		
	4	8	16
1 m/s	0.1	0.08	0.02
2 m/s	0.19	0.14	0.04
4 m/s	0.3	0.22	0.07

3.1.4.2.3 Punta Brava vs. Reanálisis 35S-56W

3.1.4.2.3.1 Comparación de climas

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38.

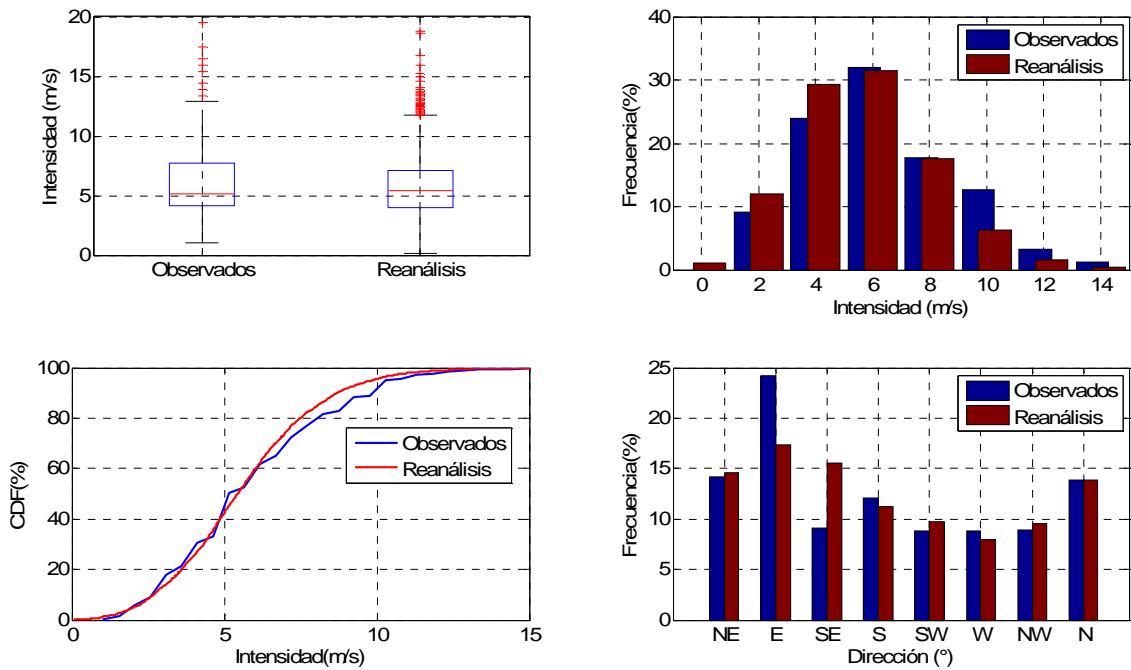


Figura 36.- Histogramas de intensidades y direcciones, diagrama de caja de intensidades y distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades. Punta Brava vs NCEP-CFSR 35S-56W.

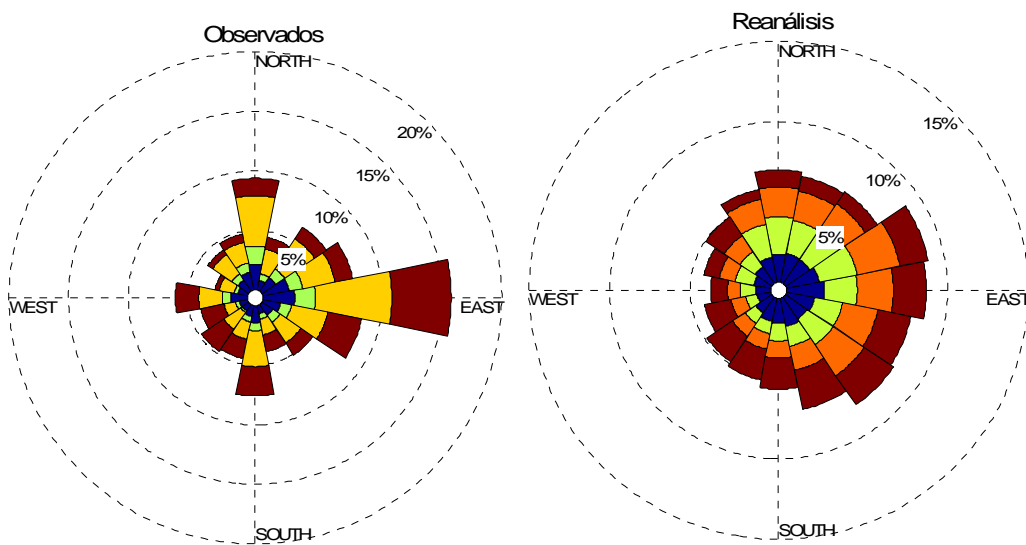


Figura 37.- Rosas de viento. Punta Brava vs NCEP-CFSR 35S-56W.

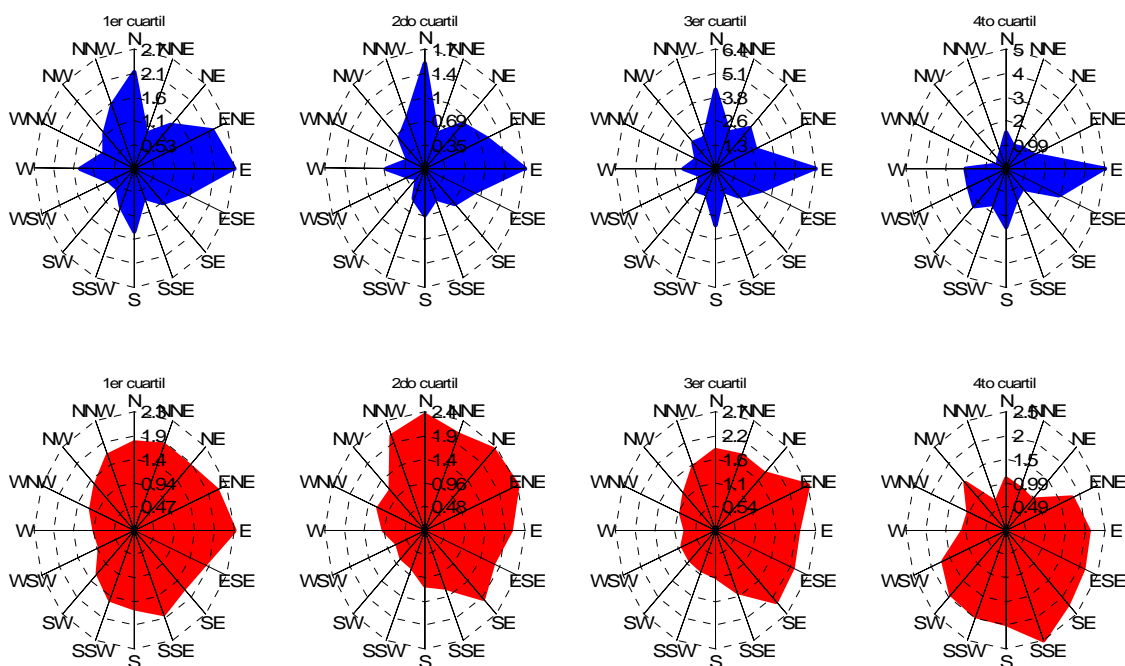


Figura 38.- Rosas de viento discriminadas por cuartiles. Punta Brava (Azul) vs NCEP-CFSR 35S-56W (Rojo).

Al igual que los resultados obtenidos a partir de los datos medidos en la estación Carrasco y corregidos para trasladarlos al mar, se observa que el clima calculado a partir de los datos de reanálisis es muy similar al calculado a partir de los datos medidos en Punta Brava. La principal diferencia se aprecia en la frecuencia de ocurrencia de la dirección este. Los datos medidos muestran una gran concentración de los datos en esta dirección mientras que tal concentración no se aprecia en los datos de reanálisis que parecen distribuir estos datos en las direcciones contiguas.

3.1.4.2.3.2 Comparación visual de las series

En la Figura 39 se muestran superpuestos los datos observados y los datos de reanálisis. En la Figura 40 se muestra la comparación mediante diagramas de dispersión.

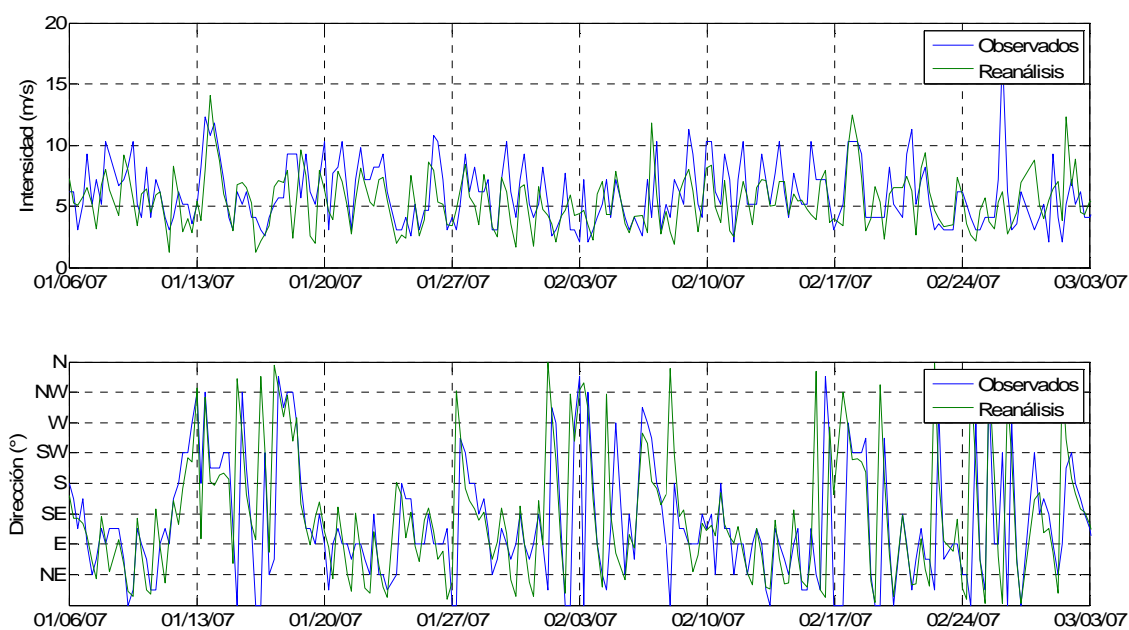


Figura 39.- Serie temporal de intensidad y dirección. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

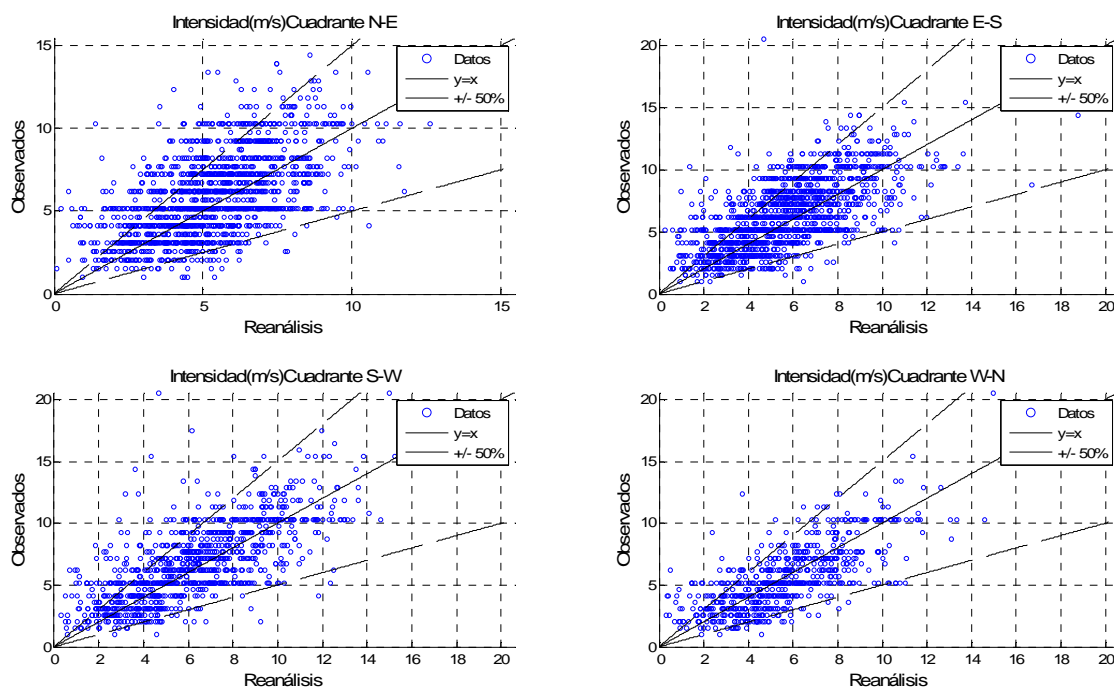


Figura 40.- Diagramas de dispersión de intensidades de viento discriminadas por cuadrante. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

Se observa una tendencia a que las intensidades medidas en Punta Brava sean subestimadas por los datos del punto 35S-56W del reanálisis.

3.1.4.2.3.3 Estadísticos de verificación continua

En la Tabla 14 y la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos de calcular los distintos estadísticos de verificación continua considerando los datos medidos en Punta Brava como los datos observados y los datos de reanálisis en el punto de grilla 35S-56W como los datos estimados.

Tabla 14.- Estadísticos de verificación continua. Intensidad del viento. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

	EM(m/s)	MAE (m/s)	RMSE(m/s)	LEPS	r	SSP	SSC
Todos	-0.44	1.67	2.16	0.18	0.66	0.22	0.45
Cuadrante N-E	-0.61	1.69	2.16	0.20	0.58		
Cuadrante E-S	-0.66	1.72	2.20	0.18	0.66		
Cuadrante S-W	-0.52	1.74	2.34	0.16	0.72		
Cuadrante W-N	-0.02	1.54	1.97	0.18	0.68		

Tabla 15.- Estadísticos de verificación continua. Dirección del viento. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

MAE (°)	SSP
27	0.12

Los valores negativos del error medio confirman que las intensidades medidas en Punta Brava son subestimadas por los datos del punto 35S-56W del reanálisis. De todas formas, los errores son bajos, los coeficientes de correlación son altos para cualquiera de los cuadrantes y los indicadores de habilidad son positivos, tanto para la intensidad como para la dirección.

3.1.4.2.3.4 Estadísticos de verificación categórica

En la Figura 41 y en la Figura 42 se presentan los resultados de calcular los estadísticos de verificación categórica para la intensidad y dirección del viento respectivamente.

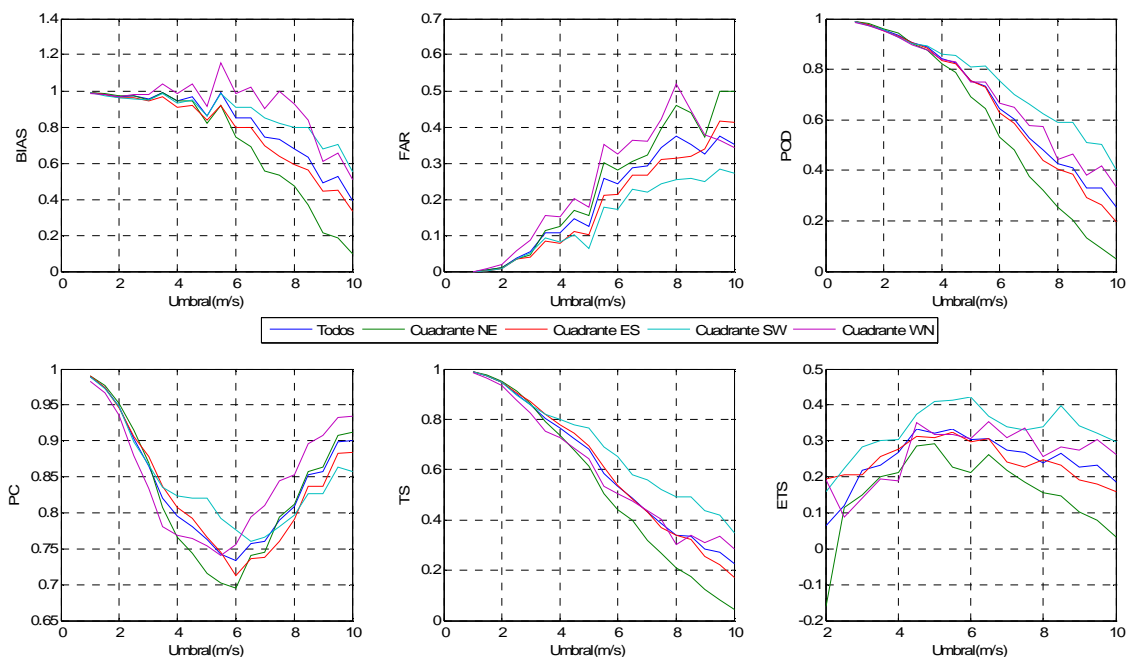


Figura 41.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

Los resultados obtenidos para los distintos cuadrantes son similares, siendo los vientos provenientes del cuadrante S-W los mejores representados por los datos de reanálisis.

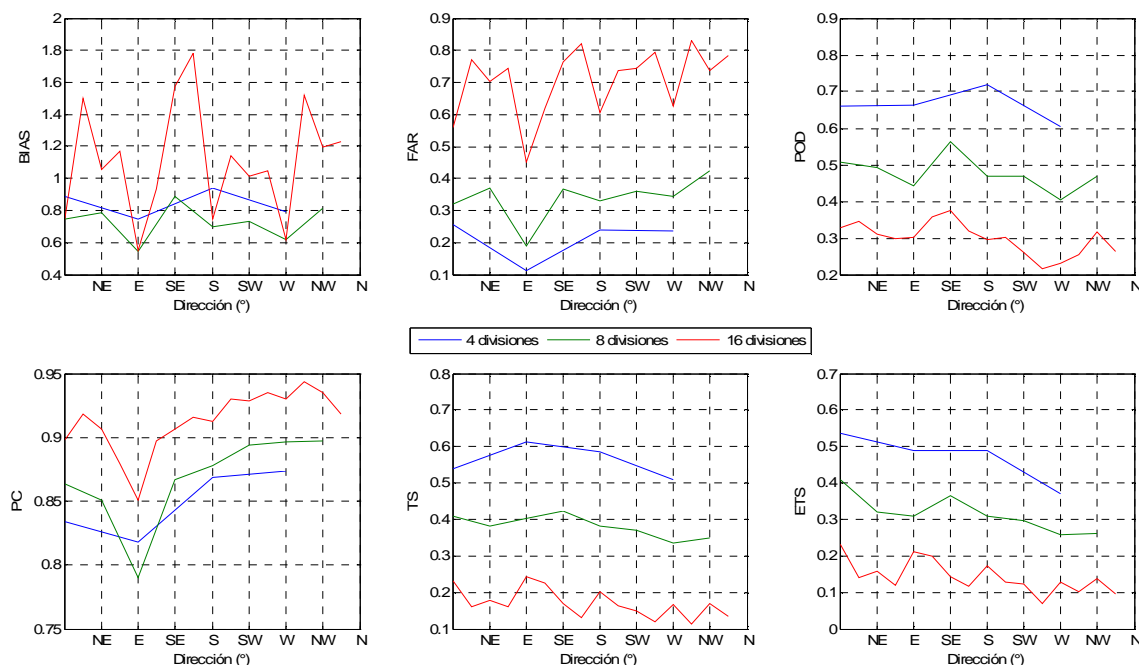


Figura 42.- Estadísticos de verificación categórica. Dirección del viento. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

En términos generales se obtuvieron resultados similares a las comparaciones de las series presentadas anteriormente. La curva roja (16 divisiones) muestra nuevamente las diferencias obtenidas para los vientos de dirección este.

En la Tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de calcular el Indicador de habilidad de Heidke para distintas combinaciones de rangos de intensidades y rangos de direcciones.

Tabla 16.- Indicador de habilidad de Heidke. Punta Brava (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35S-56W.

Rango intensidades	División direcciones		
	4	8	16
1 m/s	0.09	0.07	0.05
2 m/s	0.18	0.12	0.09
4 m/s	0.32	0.21	0.15

3.1.4.2.4 Pontón de Recalada vs Reanálisis 35.5S-56W

3.1.4.2.4.1 Comparación de climas

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 43, Figura 44 y Figura 45.

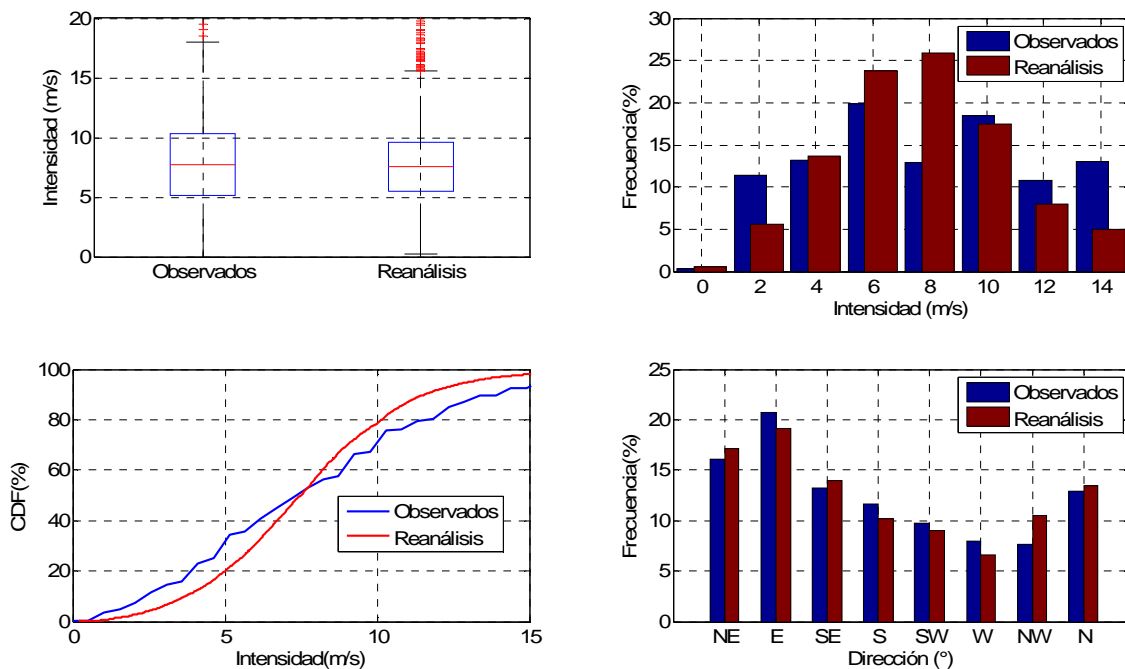


Figura 43.- Histogramas de intensidades y direcciones, diagrama de caja de intensidades y distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades. Pontón de Recalada vs NCEP-CFSR 35.5S-56W.

Se aprecian diferencias en la distribución de las intensidades que posiblemente estén vinculadas a la observación vertida en el análisis exploratorio (3.1.4.1.3).

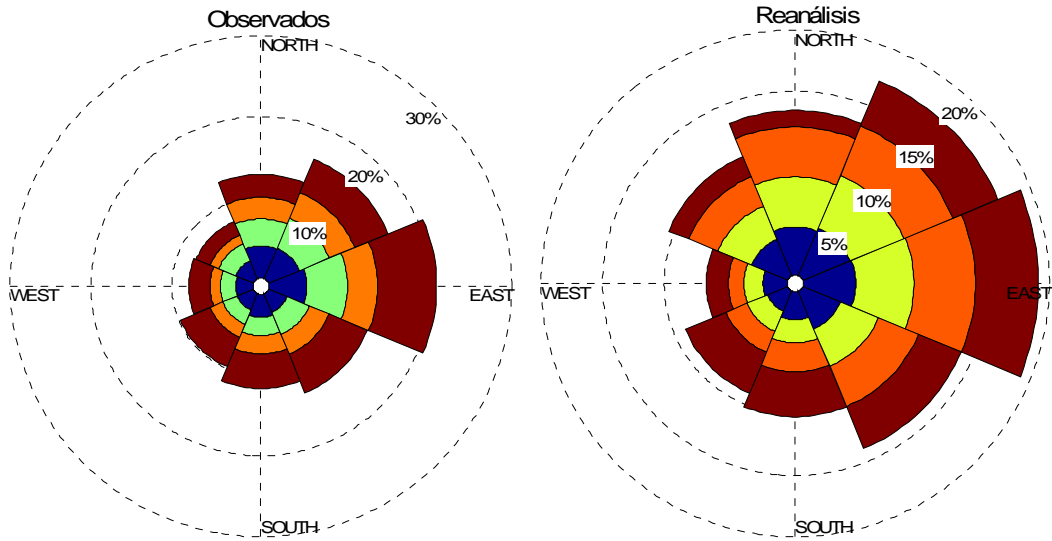


Figura 44.- Rosas de viento. Pontón de Recalada vs NCEP-CFSR 35.5S-56W.

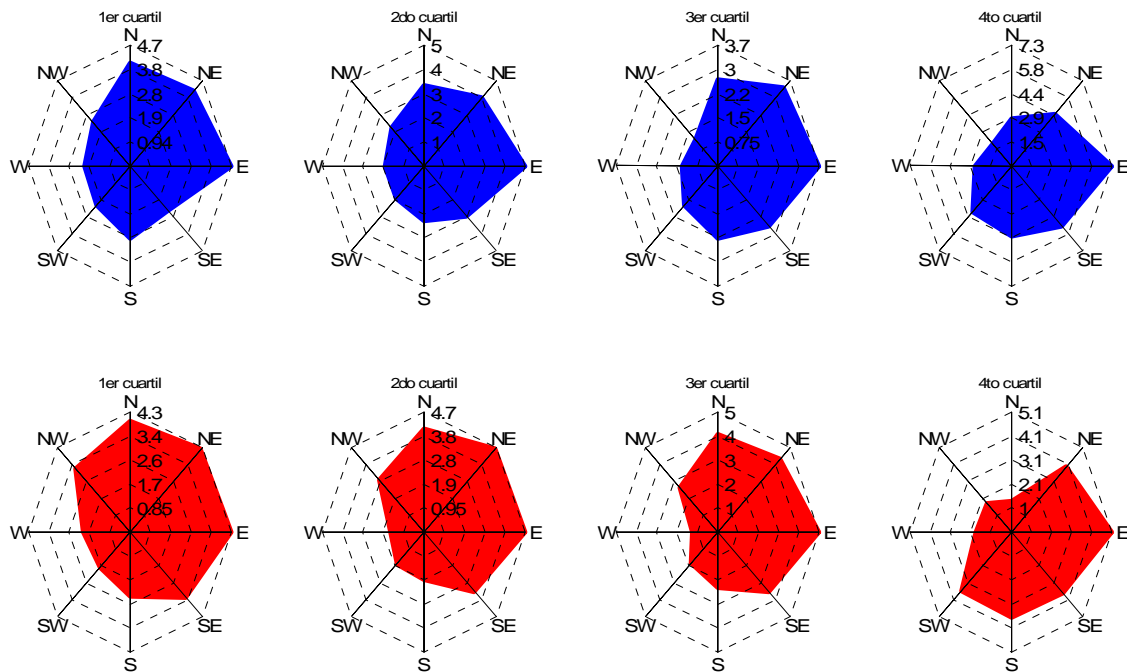


Figura 45.-Rosas de viento discriminadas por cuartiles. Pontón de Recalada (Azul) vs NCEP-CFSR 35.5S-56W(Rojo).

Tanto los histogramas de direcciones como las rosas de viento muestran que la distribución de las direcciones del viento observadas en Pontón de Recalada estarían bien representadas por los datos de reanálisis del punto 35.5S-56W.

3.1.4.2.4.2 Comparación visual de las series

En la Figura 46 se muestran superpuestos los datos observados y los datos de reanálisis. En la Figura 47 se muestra la comparación mediante diagramas de dispersión.

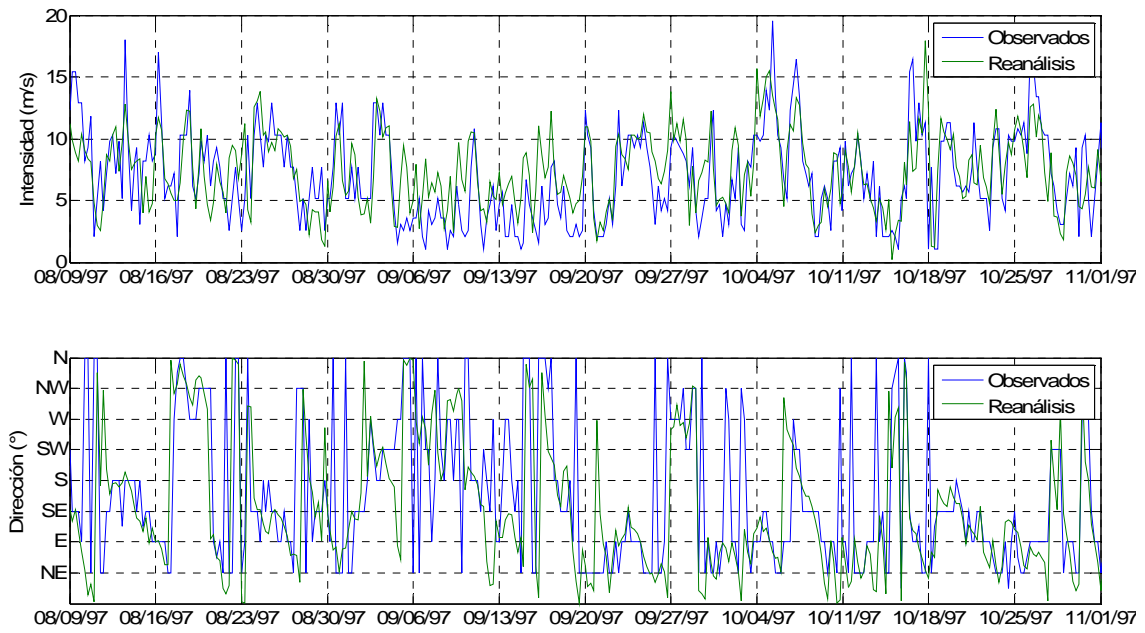


Figura 46.- Serie temporal de intensidad y dirección. Pontón de Recalada(Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

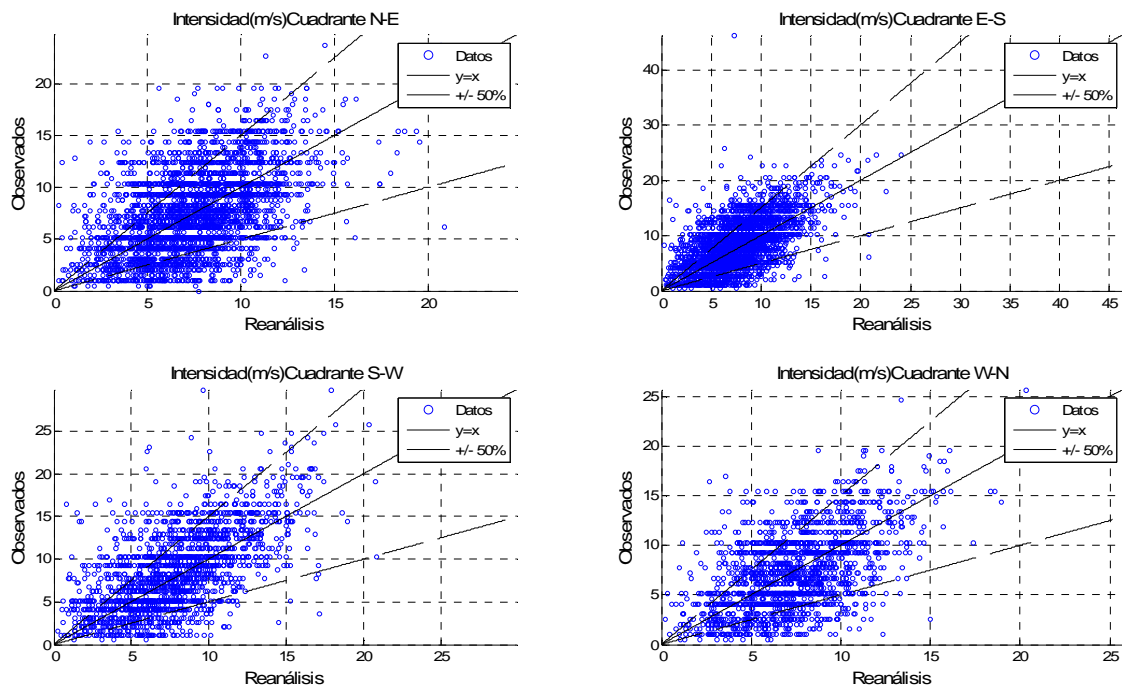


Figura 47.- Diagramas de dispersión de intensidades de viento discriminadas por cuadrante. Pontón de Recalada (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

Se observa una mayor dispersión de los datos que las obtenidas a partir de las comparaciones presentadas previamente (Carrasco, Boya oceanográfica, Punta Brava).

3.1.4.2.4.3 Estadísticos de verificación continua

En la Tabla 17 y la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos de calcular los distintos estadísticos de verificación continua considerando los datos medidos en Pontón de Recalada como los datos observados y los datos de reanálisis en el punto de grilla 35.5S-56W como los datos estimados.

Tabla 17.- Estadísticos de verificación continua. Intensidad del viento. Pontón de Recalada (Observados) vs Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

	EM(m/s)	MAE (m/s)	RMSE(m/s)	LEPS	r	SSP	SSC
Todos	-0.42	2.83	3.63	0.21	0.58	-0.02	0.42
Cuadrante N-E	-0.34	2.82	3.56	0.22	0.52		
Cuadrante E-S	-0.70	2.87	3.71	0.20	0.59		
Cuadrante S-W	-0.72	2.90	3.78	0.19	0.63		
Cuadrante W-N	0.14	2.69	3.39	0.22	0.55		

Tabla 18.- Estadísticos de verificación continua. Dirección del viento. Pontón de Recalada (Observados) vs Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

MAE (°)	SSP
46.6	-0.08

Se obtuvieron mayores errores que en el resto de las series analizadas e indicadores de habilidad negativos considerando como estimador de referencia la persistencia (SSP). Como aspecto positivo se destacan los altos valores de los coeficientes de correlación.

3.1.4.2.4.4 Estadísticos de verificación categórica

En la Figura 48 y en la Figura 49 se presentan los resultados de calcular los estadísticos de verificación categórica para la intensidad y dirección del viento respectivamente.

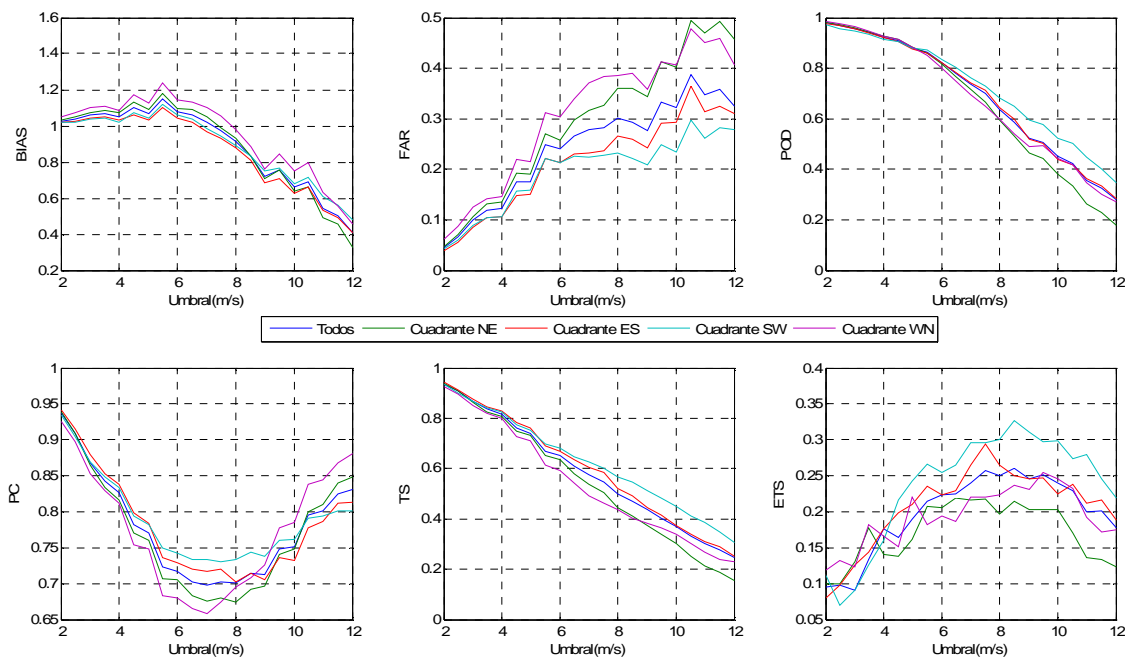


Figura 48.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Pontón de Recalada (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

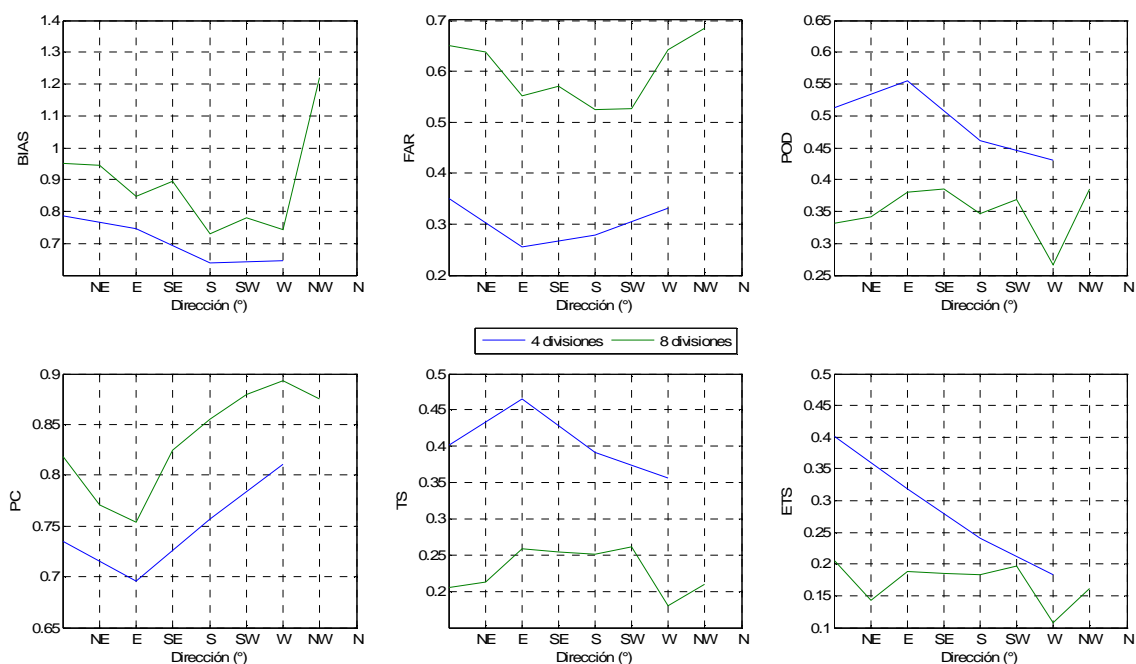


Figura 49.- Estadísticos de verificación categórica. Dirección del viento. Pontón de Recalada (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos de calcular el Indicador de habilidad de Heidke para distintas combinaciones de rangos de intensidades y rangos de direcciones.

Tabla 19 .- Indicador de habilidad de Heidke. Pontón de Recalada (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 35.5S-56W.

Rango intensidades	División direcciones		
	4	8	16
1 m/s	0.04	0.03	0.02
2 m/s	0.08	0.06	0.03
4 m/s	0.14	0.11	0.06

Los distintos estadísticos de comparación categórica calculados mostraron, en general, peores resultados que en el resto de las series comparadas. Se entiende que esto se deba a algún inconveniente de los datos de Pontón de Recalada en algún período dentro del período analizado.

3.1.4.2.5 Pilote Norden vs Reanálisis 34.5S-58W

3.1.4.2.5.1 Comparación de climas

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 50, Figura 51 y Figura 52.

Se observa una buena representación de la distribución de las direcciones y una tendencia a subestimación de las intensidades por parte de los datos de reanálisis en el punto 34.5S-58W respecto a los datos medidos en Pilote Norden.

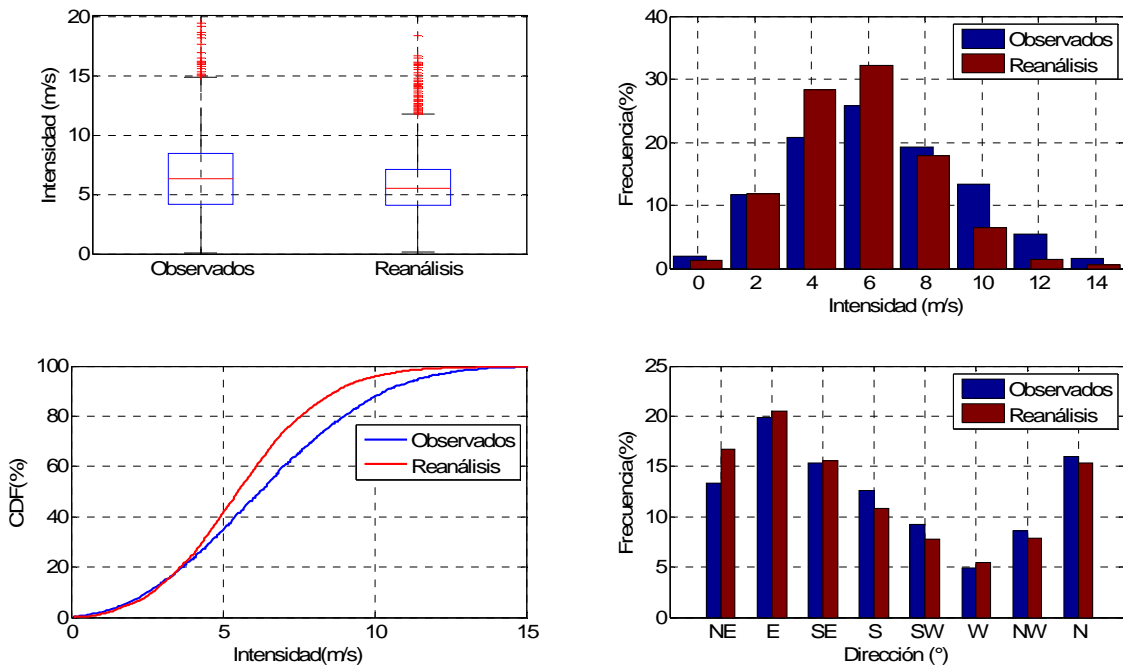


Figura 50.- Histogramas de intensidades y direcciones, diagrama de caja de intensidades y distribución empírica de frecuencias acumuladas de intensidades. Pilote Norden vs NCEP-CFSR 34.5S-58W.

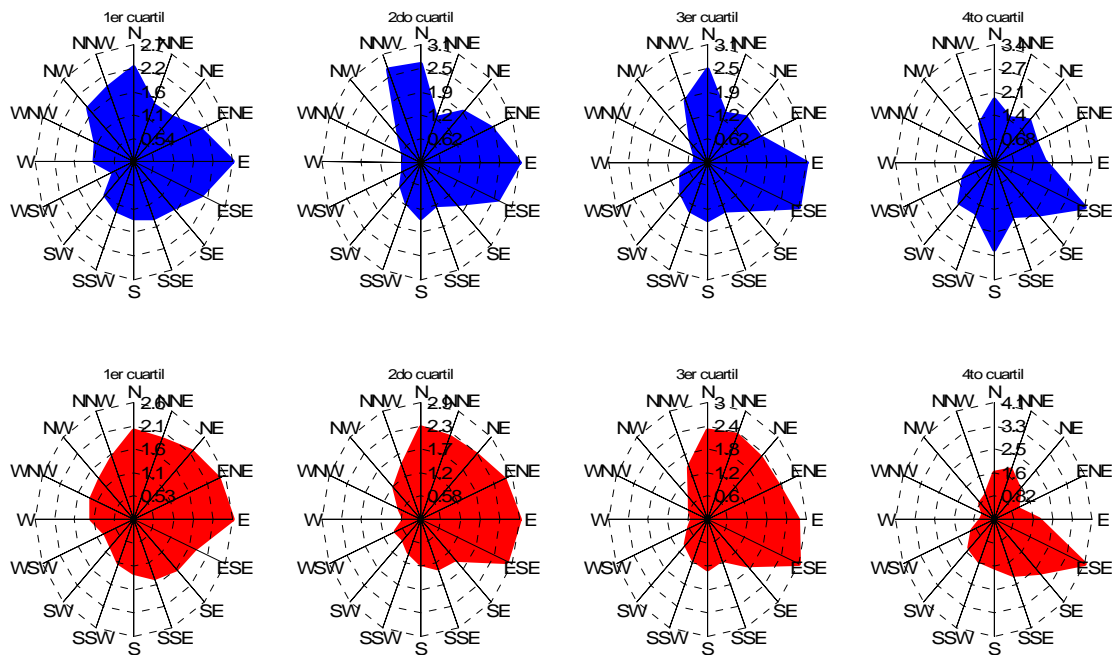


Figura 51.- Rosas de viento discriminadas por cuartiles. Pilote Norden (Azul) vs NCEP-CFSR 34.5S-58W (Rojo).

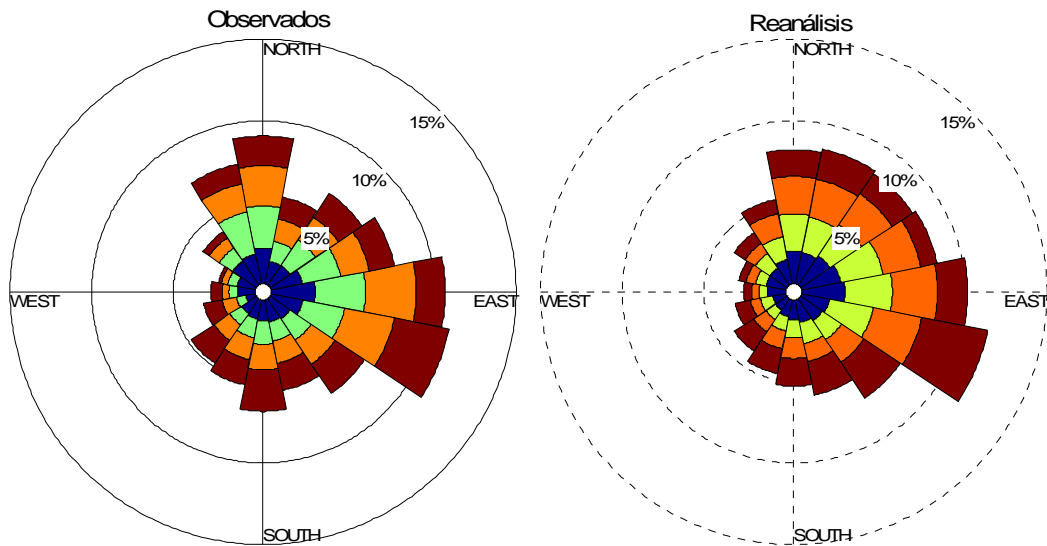


Figura 52.- Rosas de viento. Pilote Norden vs NCEP-CFSR 34.5S-58W.

3.1.4.2.5.2 Comparación visual de las series

En la Figura 53 se muestran superpuestos los datos observados y los datos de reanálisis. En la Figura 54 se muestra la comparación mediante diagramas de dispersión.

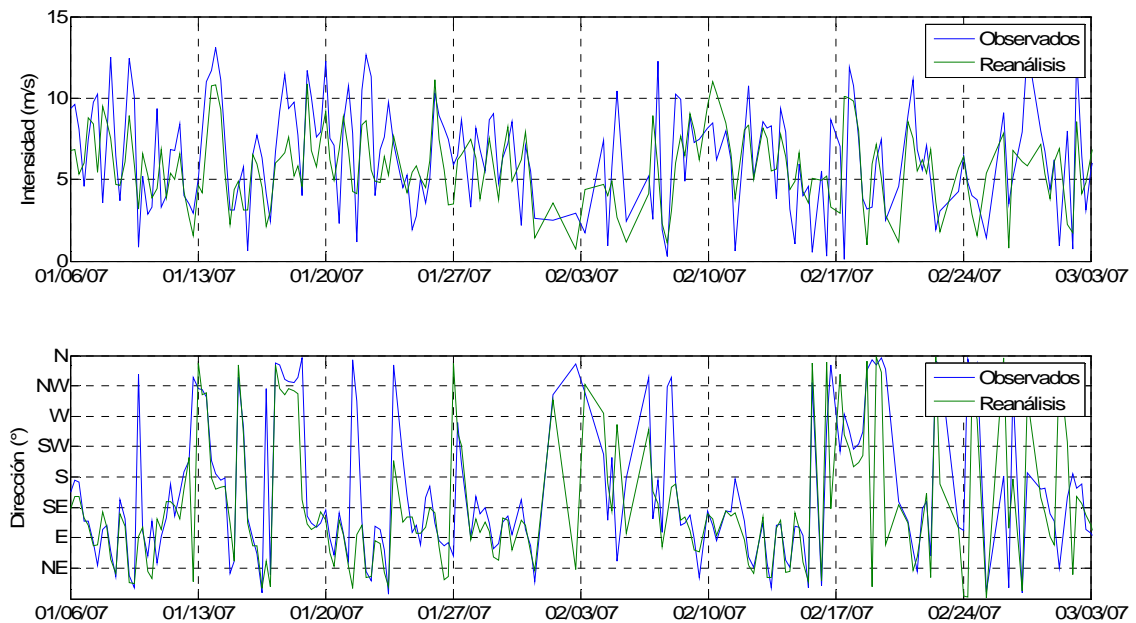


Figura 53.- Serie temporal de intensidad y dirección. Pilote Norden(Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

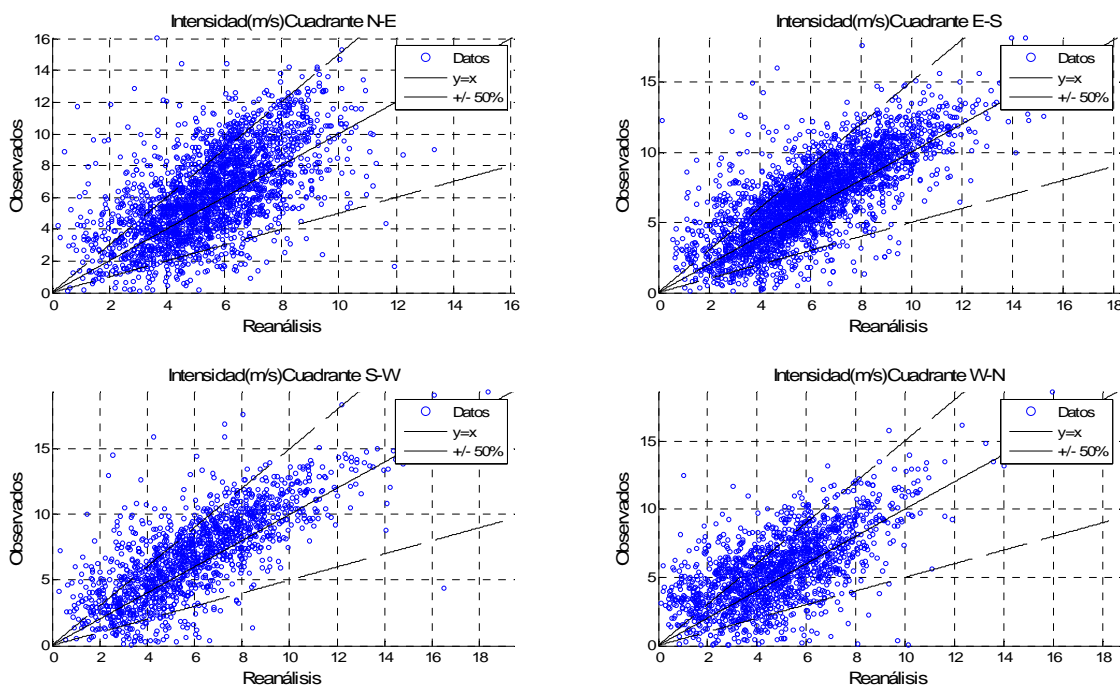


Figura 54.- Diagramas de dispersión de intensidades de viento discriminadas por cuadrante. Pilote Norden(Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

Se observa que los datos de reanálisis representan las variaciones de la serie de datos medidos pero en general el dato de intensidad es subestimado.

3.1.4.2.5.3 Estadísticos de verificación continua

En la Tabla 20 y la Tabla 21 se presentan los resultados obtenidos de calcular los distintos estadísticos de verificación continua considerando los datos medidos en Pilote Norden como los datos observados y los datos de reanálisis en el punto de grilla 34.5S-58W como los datos estimados.

Tabla 20.-Estadísticos de verificación continua. Intensidad del viento. Pilote Norden(Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

	EM(m/s)	MAE (m/s)	RMSE(m/s)	LEPS	r	SSP	SSC
Todos	-0.75	1.74	2.25	0.16	0.71	0.29	0.48
Cuadrante N-E	-0.72	1.80	2.31	0.18	0.62		
Cuadrante E-S	-0.69	1.61	2.11	0.15	0.75		
Cuadrante S-W	-0.92	1.81	2.37	0.15	0.76		
Cuadrante W-N	-0.74	1.80	2.29	0.19	0.64		

Tabla 21.- Estadísticos de verificación continua. Dirección del viento. Pilote Norden (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

MAE (°)	SSP
27.7	0.32

Los valores negativos del error medio confirman que las intensidades medidas en Pilote Norden son subestimadas por los datos del punto 34.5S-58W del reanálisis. De todas formas, los errores son bajos, los coeficientes de correlación son altos para cualquiera de los cuadrantes y los indicadores de habilidad son positivos, tanto para la intensidad como para la dirección.

3.1.4.2.5.4 Estadísticos de verificación categórica

En la Figura 55 y en la Figura 56 se presentan los resultados de calcular los estadísticos de verificación categórica para la intensidad y dirección del viento respectivamente.

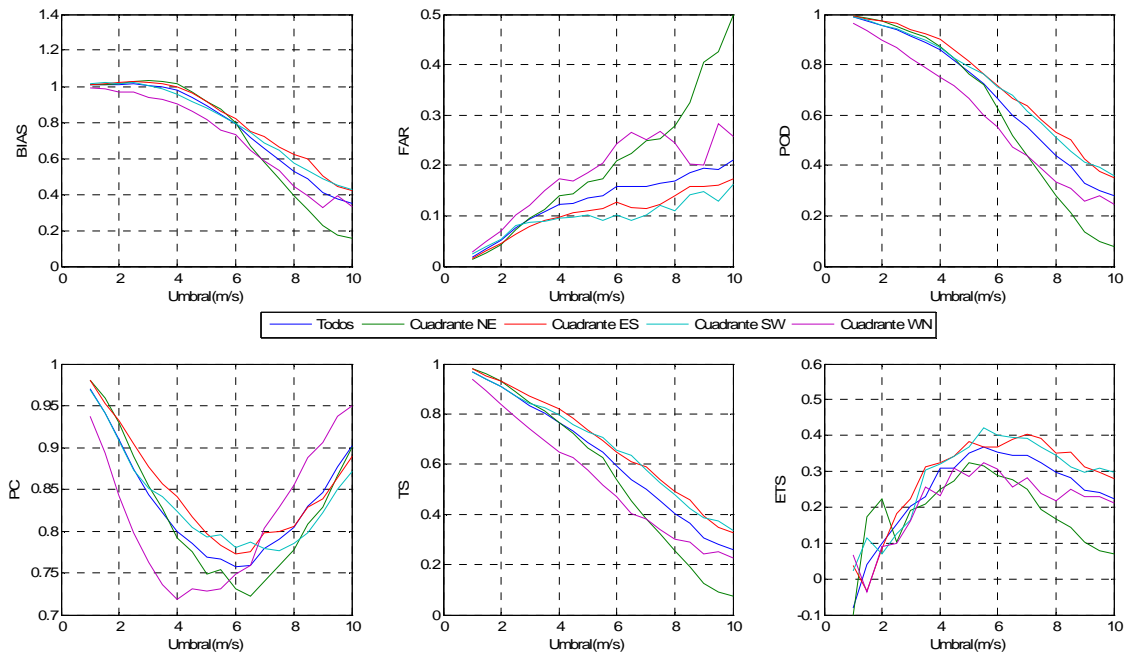


Figura 55.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Pilote Norden (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

El resultado del estadístico BIAS refleja la subestimación de los datos observados por parte de los datos de reanálisis. El resto de los estadísticos muestran que los vientos mejor representados son los que provienen de los cuadrantes E-S y S-W.

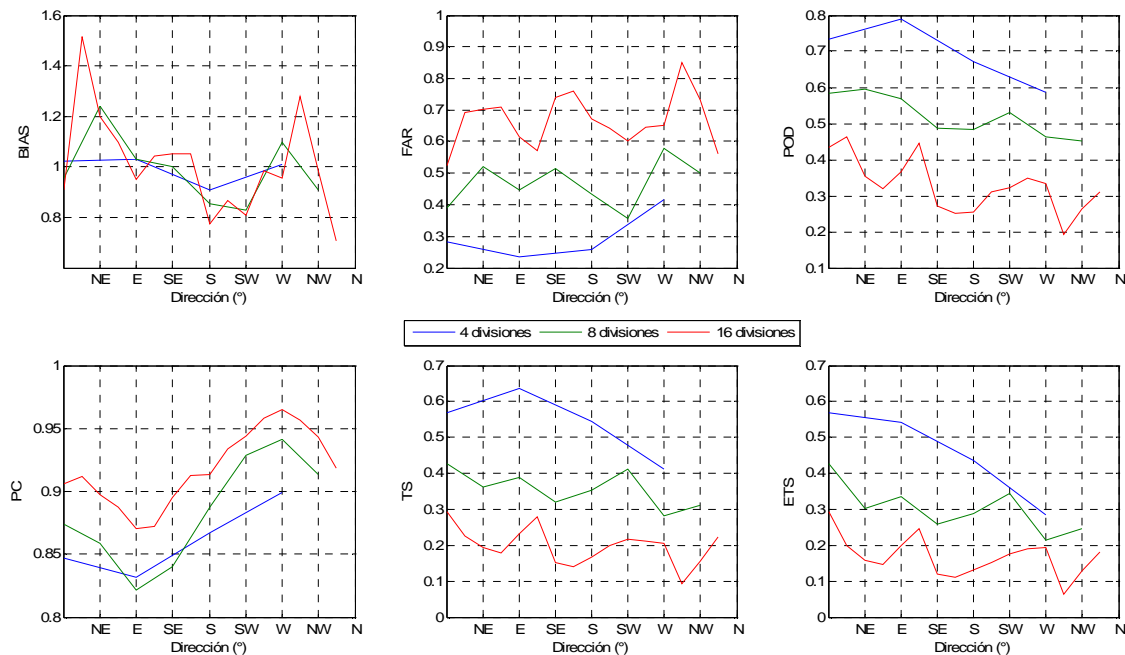


Figura 56.- Estadísticos de verificación categórica. Intensidad del viento. Pontón de Recalada (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

En términos generales se obtuvieron resultados similares a las comparaciones de las series presentadas anteriormente, sin considerar a Pontón de Recalada.

En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos de calcular el Indicador de habilidad de Heidke para distintas combinaciones de rangos de intensidades y rangos de direcciones.

Tabla 22 .- Indicador de habilidad de Heidke. Pilote Norden (Observados) y Reanálisis NCEP-CFSR 34.5S-58W.

Rango intensidades	División direcciones		
	4	8	16
1 m/s	0.11	0.09	0.06
2 m/s	0.21	0.16	0.11
4 m/s	0.36	0.28	0.18

3.1.5 Conclusiones

Se realizó un análisis exploratorio de las distintas series disponibles de datos de viento medidos en el mar y en la costa. Se obtuvieron mayores intensidades medias con los datos medidos en el mar (Pontón de Recalada y Pilote Norden) que con los datos medidos en la costa (Carrasco y Punta Brava). Este resultado también se constató con el campo de intensidades medias calculadas a partir de los datos de reanálisis, en el cual se aprecia una diferencia de al menos 3 m/s entre la zona marítima y la zona continental.

En todas las series se identificó un comportamiento similar de la dirección del viento. Se obtuvo que los vientos provienen mayoritariamente de los cuadrantes E-S y N-E. Resultado que es consistente con el valor negativo del promedio de la componente zonal de la velocidad, obtenido a partir de los datos de reanálisis en la zona que contiene a los distintos puntos de medición. También se obtuvo que los vientos menos intensos, correspondientes al primer y segundo cuartil de intensidades, provienen mayoritariamente de los cuadrantes norte (W-N y N-E), mientras que los vientos de mayor intensidad, correspondientes a los cuartiles superiores, provienen mayoritariamente de los cuadrantes sur (E-S y S-W). En particular los vientos del suroeste presentan una frecuencia de ocurrencia muy baja en el total de la serie pero predominan en el cuartil superior de intensidades.

En lo que respecta a la variación estacional, se observó en todas las series, que las mayores intensidades se registran en primavera, seguido por el verano, luego en invierno y finalmente en otoño. Respecto a las direcciones, se observó que en primavera y verano los vientos provienen mayoritariamente de los cuadrantes E-S y N-E mientras que en otoño e invierno los vientos que provienen de los otros dos cuadrantes adquieren un mayor peso.

Se cuenta con poca información de cómo fueron medidos los datos. Las series que se consideran de mejor calidad son las correspondientes a la estación meteorológica de Carrasco y a la boya oceanográfica del proyecto Freplata—FFEM. Por lo tanto se priorizan los resultados obtenidos de la comparación de los datos de reanálisis con estas series a los efectos de extraer conclusiones.

Los resultados del análisis comparativo se los puede dividir en tres grupos: 1) los obtenidos en los puntos costeros (Carrasco y Punta Brava), 2) los obtenidos con los puntos marítimos (boya oceanográfica y Pontón de Recalada) y 3) los obtenidos en Pilote Norden que si bien es

marítimo debido al ancho del estuario en la zona en que se encuentra, no cuenta con un punto próximo de la grilla de reanálisis que se ubique enteramente en el mar.

Se obtuvo una buena representación de las series de datos medidos en puntos costeros a partir de la serie de datos de reanálisis correspondiente al punto de grilla 35S-56W, punto que está en el mar pero que tiene vecinos en el continente.

Se obtuvo una buena representación de las series de datos medidos en puntos marítimos a partir de la serie de datos de reanálisis correspondiente al punto enteramente marítimo más próximo (35.5S-56W en el caso de Pontón de Recalada y 35.5S-56.5W en el caso de la boya oceanográfica). Sin embargo, la representación no es buena si se consideran los datos de reanálisis interpolados. En este caso los datos de reanálisis subestiman ampliamente a los datos medidos.

En el caso de Pilote Norden, al no poder comparar con un punto enteramente marítimo, se obtuvo que los datos de reanálisis subestiman los datos medidos.

Una buena representación refiere a que se obtuvieron climas de vientos similares, no se observan grandes diferencias en la comparación visual de las series, se obtuvieron bajos valores de las distintas medidas del error consideradas, se obtuvieron coeficientes de correlación entre 0.5 y 0.7, y valores positivos de los distintos indicadores de habilidad considerados.

Los estadísticos de verificación categórica muestran que los vientos provenientes de los cuadrantes E-S y S-W son los mejores representados por los datos de reanálisis. Este resultado es significativo desde el punto de vista de la determinación del clima de olas, pues estos vientos son los que, en general, tienen una mayor incidencia en las características del oleaje en la zona marítima de Uruguay.

En cuanto a las direcciones, se obtuvieron resultados similares en los distintos casos. La probabilidad de detección por parte de los datos de reanálisis del cuadrante desde el cual proviene el viento es de aproximadamente 70 %, mientras que para detectar el octante desde el cual proviene es de 50 % aproximadamente.

Por todo lo expuesto, se entiende que los datos de viento a 10 m de altura obtenidos del reanálisis NCEP-CFSR constituyen una buena representación del viento sobre el mar a los efectos de utilizarlos en la determinación del clima de oleaje a partir de modelos computacionales.

3.2 Oleaje

3.2.1 Medidas in-situ

Las mediciones in-situ constituyen la fuente de información del oleaje más fiable (Chung-Chu Teng, 2002). Esto hace que sean consideradas como base de referencia para el análisis de calidad y calibración de los datos obtenidos mediante simulaciones, así como de los datos obtenidos de otras fuentes de información, ya sea registros visuales (única fuente de información previa al desarrollo de estos equipos) o datos satelitales. Estos equipos brindan información de calidad pero localizada generalmente en muy pocos puntos, fundamentalmente si se trata del hemisferio sur. Por lo tanto, para una caracterización regional del oleaje, necesariamente deben ser complementados con otras fuentes de información y con la implementación de modelos computacionales.

Existen distintos instrumentos capaces de medir el oleaje en el mar con una muy buena precisión para los intereses ingenieriles. El objetivo de la instalación de estos equipos es la obtención de un registro de largo plazo de los estados de mar en el sitio donde se emplazan. Dependiendo del instrumental, es posible obtener las características direccionales del oleaje, a partir de un espectro bidimensional o bien el instrumento se limita a registrar un espectro unidimensional sin brindar información sobre la dirección del oleaje. Los equipos pueden estar montados en una estructura fija como un muelle o una plataforma, estar en el fondo del mar o montados en una boya.

Los equipos montados en estructuras fijas usualmente consisten en circuitos eléctricos en los que la posición de la superficie libre del mar incide en el estado del circuito. Por lo tanto, a partir de la señal eléctrica registrada se infiere un registro de las variaciones de la superficie libre del mar del cual se obtiene un espectro unidimensional del estado de mar. Para obtener una medida de la dirección del oleaje es necesario tres o más de estos instrumentos dispuestos en arreglos convenientes.

Los equipos sumergidos, ya sea instalados en el fondo del mar o a cierta distancia del mismo, consisten en o bien una ecosonda invertida, un transductor de presión o un correntímetro. La ecosonda invertida emite un pulso de sonido en la dirección vertical y en sentido ascendente, el pulso es reflejado en la superficie del mar y luego registrado por el equipo. El tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción del pulso constituye una medida del nivel de la superficie del mar. El transductor de presión registra las variaciones de presión a la profundidad en la que se encuentra y por medio de la teoría lineal, a partir del registro de presión, se infiere un registro de las variaciones del nivel del mar. Tanto en el caso de la ecosonda como el transductor de presión, para obtener información direccional del oleaje se necesita al menos tres sensores. Por el contrario, el correntímetro registra el perfil vertical de la componente horizontal de la velocidad. De dicho registro se identifica la componente orbital inducida por el oleaje, la cual permite inferir las características direccionales del estado de mar registrado.

Los equipos de medición del oleaje del tipo boya, consisten en una boya con sensores que registran su movimiento. A partir del movimiento de la boya se estima el oleaje que lo indujo. Cuanto más se asemeje el movimiento de la boya al de las partículas de la superficie libre,

mayor precisión se obtiene en la medición. Generalmente las boyas cuentan con un acelerómetro que mide su aceleración vertical, e integrándola dos veces permite obtener un registro de las variaciones de la superficie libre. Para obtener información direccional se requieren más sensores. Algunos modelos utilizan inclinómetros que miden giros respecto a dos direcciones ortogonales (*pitch and roll*), otros utilizan sensores para capturar el movimiento horizontal de la boya. Ambos modelos requieren de un sensor que monitoree la posición del norte geográfico. Generalmente disponen de un emisor de radio mediante el cual envían la señal a una estación receptora en tierra firme o bien transmiten sus datos vía satélite. Algunos modelos recientes cuentan con detectores de posición mediante GPS. La información obtenida del GPS también puede ser utilizada para determinar el oleaje. Este principio es utilizado, por ejemplo, en la boya GPS-WAVERIDER de la empresa Datawell.

En este trabajo se contó con la información de dos instrumentos de medición del oleaje in-situ. Uno de ellos, ubicado en las coordenadas 35°40'S-55°50'W (Dragani et.al, 2010), consiste en una boya Waverider de la empresa Datawell capaz de medir las características direccionales del oleaje. Esta boya fue instalada, operada y mantenida por la empresa Hidrovía S.A. De la misma se disponen las series de los principales parámetros del oleaje correspondientes a los estados de mar registrados por el instrumento entre junio de 1996 y setiembre de 2006. El otro equipo se localiza en la costa de Montevideo, en las coordenadas 34°57'36"S-56°09'39"W. Se trata de un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP por sus siglas en inglés) instalado, operado y mantenido entre el IMFIA, la Intendencia de Montevideo (IM) y el Servicio de Oceanografía e Hidrografía de la Armada (SOHMA). En la Figura 57 se indica la localización de estos dos equipos de medición superpuesto con la batimetría de la zona, mientras que en la Tabla 23 se presentan la profundidad y distancias de *fetch* aproximadas correspondientes a estos dos puntos de medición. En lo que resta del documento se hará mención al lugar donde está instalada la boya Waverider como Hidrovía y al lugar donde está instalado el ADCP como Punta Brava.

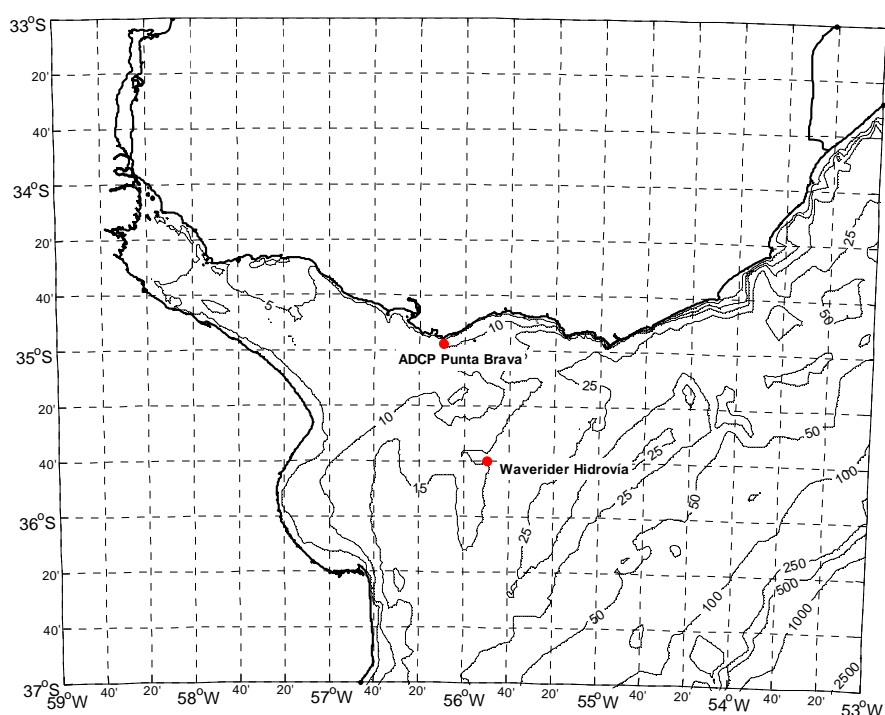


Figura 57.- Localización de los instrumentos de medición in-situ: Boya Waverider(Hidrovía) y ADCP (Punta Brava).

Tabla 23.-Profundidad y distancias de *fetch* en Hidrovía y Punta Brava. (* Significa oleaje no limitado por *fetch*).

	Profundidad (m)	Fetch(km)							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Hidrovía	9	95	150	*	*	*	115	130	200
Punta Brava	17	3	40	110	*	*	100	134	140

En los siguientes dos apartados se presentan las principales características del oleaje en Hidrovía y Punta Brava. Para ello se resumen las principales conclusiones vertidas en los trabajos antecedente que analizaron dichos datos, se presenta una actualización de algunos resultados de estos trabajos y se presenta una caracterización del potencial undimotriz en estos dos puntos.

3.2.1.1 Waverider Datawell. Hidrovía S.A.

3.2.1.1.1 Trabajos Antecedentes

Anschutz y Escalante (1998) publicaron un análisis realizado a partir de 5077 espectros registrados por la boya durante el período 20/6/1996-11/3/1998. En dicho trabajo se presenta una clasificación de los estados de mar en 5 categorías: 1) *Swell* (Mar de fondo), 2) *Prevailing Swell* (Mar de fondo predominante), 3) *Sea + Swell* (Oleaje local + Mar de fondo), 4) *Prevailing Sea* (Oleaje local predominante) y 5) *Sea* (Oleaje local). Los estados de mar los ubican en una u otra categoría en función de dos parámetros del espectro unidimensional. Estos parámetros son:

- Ancho de banda espectral: $\varepsilon = 1 - (m_2^2)/(m_0m_4)$.
- *Energy Ratio*: $Rm_0(\%) = (m_{0Sea}/m_{0Total})$.

Donde m_i es el momento de orden i del espectro unidimensional y m_{0sea} es el momento de orden 0 considerando las frecuencias mayores o iguales que 1/6 Hz. Esta frecuencia que discrimina entre energía correspondiente a oleaje local y energía correspondiente a mar de fondo fue escogida por los autores mediante un método iterativo que no se detalla en el trabajo.

Un oleaje tipo mar de fondo se caracteriza por concentrar la energía en torno a una frecuencia, siendo esta frecuencia menor que 1/6 Hz. Es decir, se caracteriza por tener un período bien definido y mayor a 6 segundos. A partir de un espectro de este tipo se obtiene un valor de ε próximo a 1 y un valor de Rm_0 próximo a 0. Por el contrario un oleaje del tipo local se caracteriza por distribuir su energía en un amplio rango de frecuencias, abarcando frecuencias mayores a 1/6 Hz. Espectros de este tipo presentan un valor de ε próximo a 0 y un valor de Rm_0 próximo a 100. En base a esto, las 5 categorías las definieron considerando los siguientes valores de referencia:

- *Swell*: $\varepsilon > 0.75$
- *Prevailing Swell*: $0.35 \leq \varepsilon < 0.75$ y $Rm_0 < 40 \%$
- *Swell + Sea*: $0.35 \leq \varepsilon < 0.75$ y $40 \% \leq Rm_0 \leq 60 \%$
- *Prevailing Sea*: $0.35 \leq \varepsilon < 0.75$ y $60 \% < Rm_0$
- *Sea*: $\varepsilon < 0.35$

Los resultados que obtuvieron se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24.- Caracterización del oleaje registrado por el Waverider Datawell. Anschutz y Escalante (1998)

	Hm ₀ (m)			Tp (seg)			Dirección predominante (°)	Frecuencia de ocurrencia (%)
	min	med	Max	min	med	max		
Swell	0.38	0.87	1.59	7.6	12.3	15.5	SE	1.06
Prevailing Swell	0.35	1.14	4.55	3.6	10.4	21.1	SE	27.10
Sea + Swell	0.35	1.12	2.82	3.7	9.3	21.0	SE	21.47
Prevailing Sea	0.41	1.17	2.71	2.7	6.0	17.4	ESE	49.03
Sea	0.56	1.48	3.66	3.2	5.1	9.0	SW	1.34

Finalmente Anschutz y Escalante concluyen que el oleaje en el sitio de medición se caracteriza por una combinación entre mar de fondo y oleaje local. Las alturas de ola significativa están comprendidas entre 0.5m y 1.5m y los períodos pico entre 4 y 6 segundos cuando predomina el oleaje local o entre 10 y 12 segundos cuando predomina el mar de fondo. En cuanto a la dirección de propagación destacan que en más del 80 % de los casos el oleaje proviene del cuadrante E-S.

3.2.1.1.2 Actualización de los resultados. Clima de olas en Hidrovía.

Se dispuso de una serie con los parámetros del oleaje¹⁴: altura de ola Hm₀, período pico (Tp), dirección pico (Dp), período T_{m01} y período T_{m02}. Los mismos fueron obtenidos a partir de las mediciones realizadas por la boya entre el 20/6/1996 y el 30/9/2006. En la Figura 58 se presenta la serie completa de altura de ola Hm₀ y se indican los 9 períodos identificados como registros continuos. La frecuencia con que se presentan los datos en la serie es variable, en la Figura 59 se presenta el histograma de las frecuencias del registro. Se observa que las frecuencias del registro varían, mayoritariamente, entre media hora y dos horas.

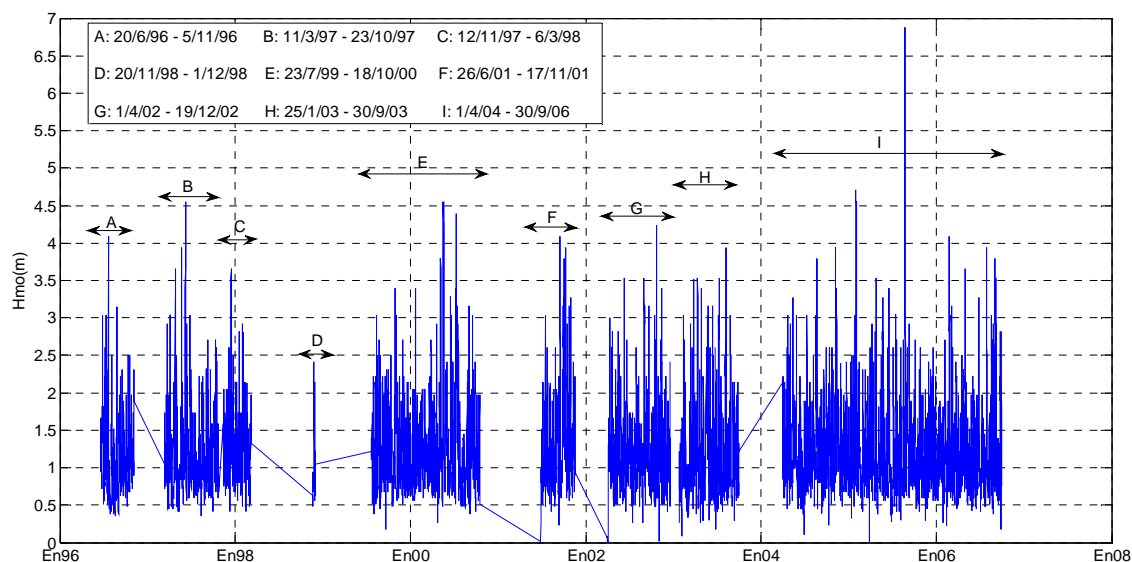


Figura 58.- Serie de datos disponibles en Hidrovía.

¹⁴ La definición de estos parámetros se explica en el apartado 2.1.4

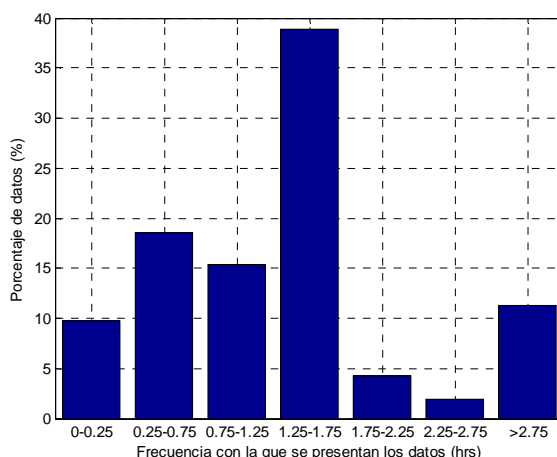


Figura 59.- Frecuencia con la que se presentan los datos en el registro de Hidrovía.

Sumando los 9 períodos identificados en la Figura 58 se completa un total de 37026 datos que equivalen a un registro continuo de 4 años aproximadamente. En base al mismo se caracterizó el clima de olas en Hidrovía. Los resultados obtenidos se presentan mediante descriptores estadísticos de los distintos parámetros (Tabla 25), diagramas de dispersión (Figura 60 y Figura 61), histogramas (Figura 62), diagramas de rosas (Figura 63) y un análisis por cuadrante cuyos resultados se presentan en la Figura 64 y la Figura 65. En el Anexo 5 se presentan algunos resultados que complementan la caracterización del clima de olas en Hidrovía.

Tabla 25.- Descriptores estadísticos. Hidrovía.

	Hmo (m)	T ₀₂ (seg)	Tp (seg)
Mínimo	0,02	1,2	1,1
Promedio	1,16	4,8	7,9
Máximo	6,88	11,7	27,3
Desviación estándar	0,52	0,9	3,3
Cuartil inferior	0,80	4,2	5,1
Mediana	1,05	4,7	7,1
Cuartil Superior	1,39	5,3	10,6

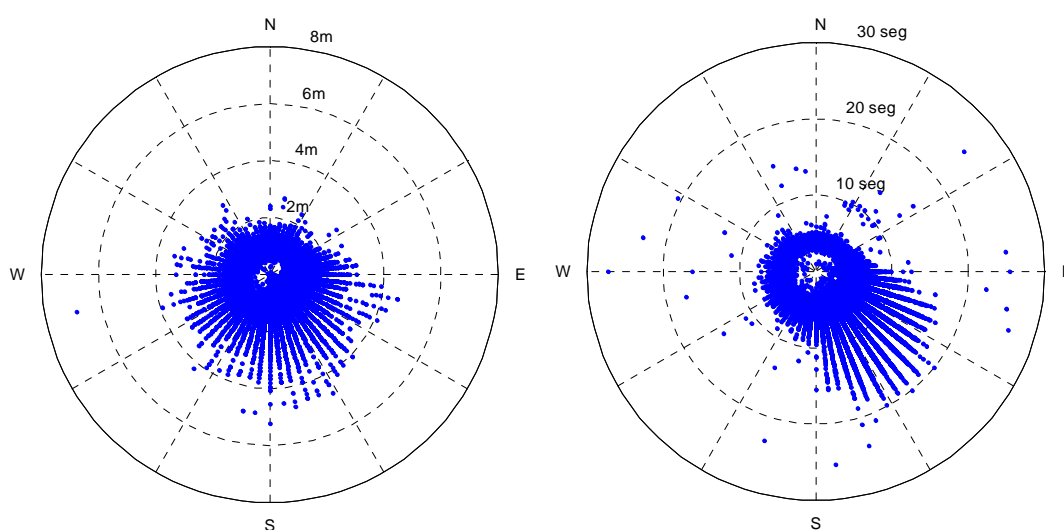


Figura 60.- Diagramas de dispersión. Hmo vs Dp (izq.) . Tp vs Dp (der.). Hidrovía

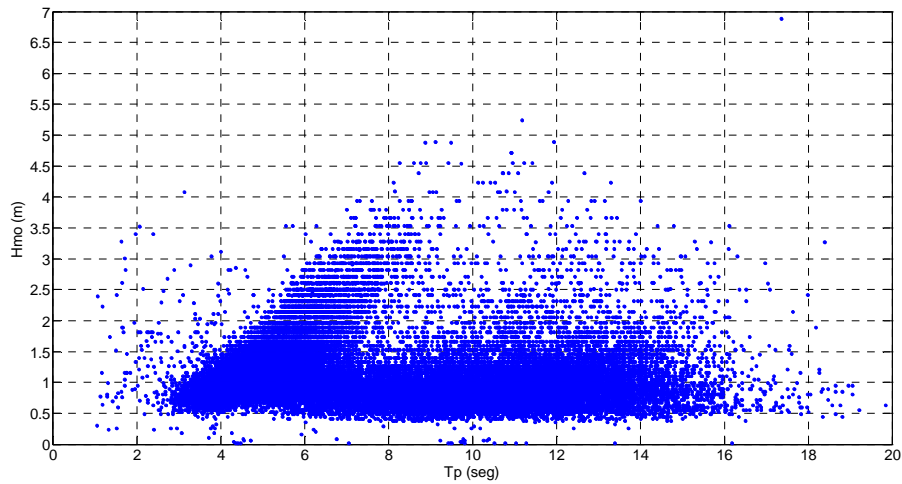


Figura 61.- Diagramas de dispersión. Hmo vs Tp. Hidrovía

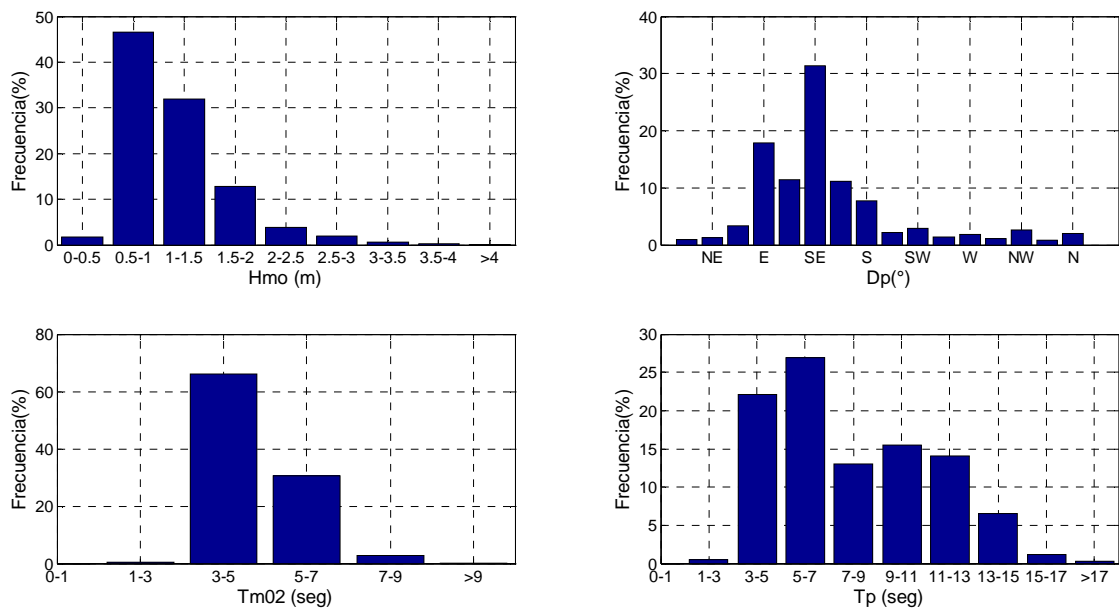


Figura 62.- Histogramas de altura de ola Hmo, Dirección pico (Dp), período Tm02 y período pico (Tp). Hidrovía

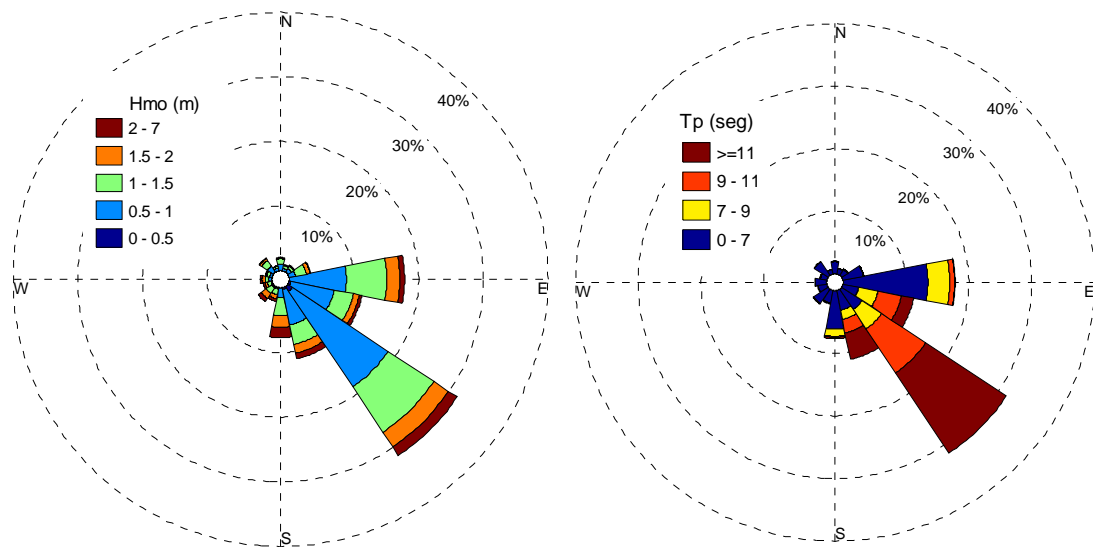


Figura 63.- Rosa de oleaje. Hidrovía

El histograma de período pico de la Figura 62 muestra que oleajes con $T_p < 7$ s tienen una frecuencia de ocurrencia similar que oleajes con $T_p > 9$ s. Asociando los primeros a estados de mar con predominio de oleaje local y los segundos a estados de mar con predominio de mar de fondo, se constata una de las características principales del clima de olas registrado en Hidrovía en cuanto a que el mismo se compone de una combinación de estados de mar con predominancia del oleaje local y predominancia del mar de fondo en proporciones similares. En la rosa de período pico de la Figura 63 se observa que los estados de mar asociados a un predominio del mar de fondo ($T_p > 9$ s) provienen casi exclusivamente de las direcciones SSE, SE y ESE. Por su parte los estados de mar asociados con un predominio del oleaje local están distribuidos en todas las direcciones con una mayor concentración en las direcciones E y S. Los restantes estados de mar, con períodos pico entre 7 y 9 segundos están distribuidos en todo el cuadrante E-S, lo que hace que para la totalidad de los datos se observe que el oleaje proviene mayoritariamente de este cuadrante, siendo SE la dirección con mayor frecuencia de ocurrencia ($> 30\%$) seguida por E (18%). El oleaje proveniente de los restantes cuadrantes presenta una frecuencia de ocurrencia menor al 20%.

Los histogramas de altura de ola H_{m0} y período T_{m02} de la Figura 62 muestran que las alturas de ola están comprendidas mayoritariamente entre 0.5 m y 1.5 m mientras que los períodos T_{m02} se presentan casi exclusivamente entre 3 y 7 segundos. En la rosa de altura de ola H_{m0} de la Figura 63 se observa que para alturas de ola menores a 1.5 m el oleaje proviene mayoritariamente del cuadrante E-S y en particular de la dirección SE, donde se presenta mayoritariamente con alturas de ola entre 0.5 y 1 m. Para alturas de ola mayores a 1.5 m adquiere una mayor relevancia el cuadrante S-W, lo que se corresponde con oleaje local generado por los intensos vientos que provienen de dicho cuadrante. Este característica del clima de olas también se observa en el análisis por cuadrante que se presenta en la Figura 64 y Figura 65, donde se observa que el oleaje proveniente del cuadrante S-W es, en términos medios, significativamente mayor que el que proviene del resto de los cuadrantes.

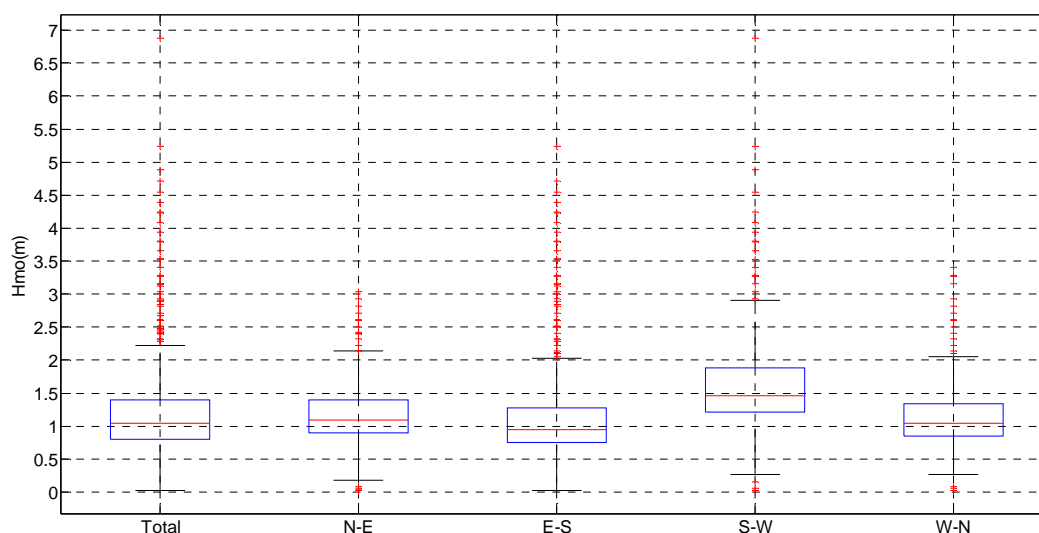


Figura 64.- Diagrama de cajas para H_{m0} discriminado por el cuadrante del cual proviene el oleaje. Hidrovía.

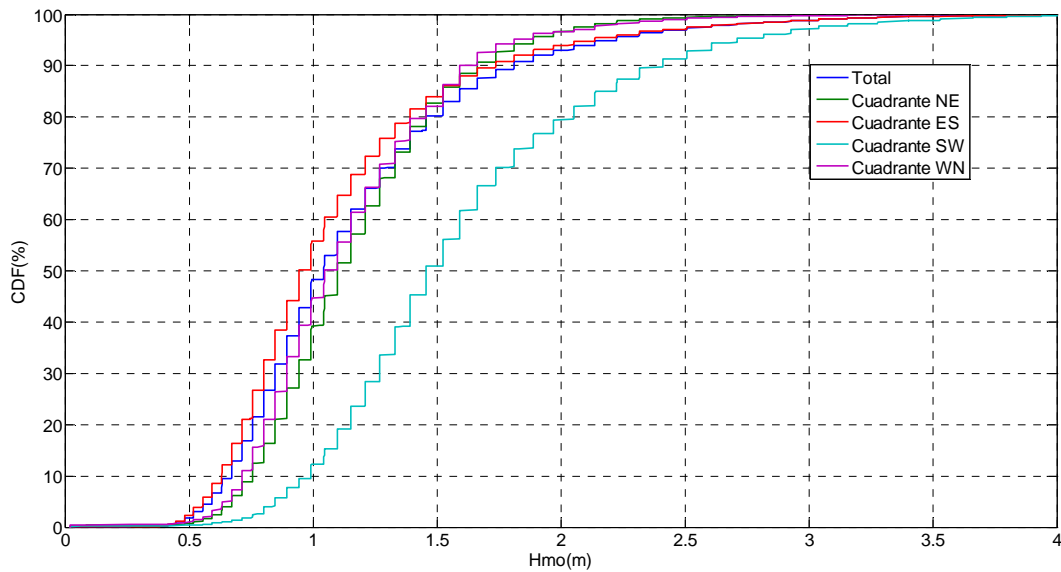


Figura 65.- Distribución empírica de frecuencias acumuladas para Hmo discriminadas por el cuadrante del cual proviene el oleaje. Hidrovía.

En la Figura 66 y la Figura 67 se presenta un análisis de la variación estacional del oleaje registrado en Hidrovía.

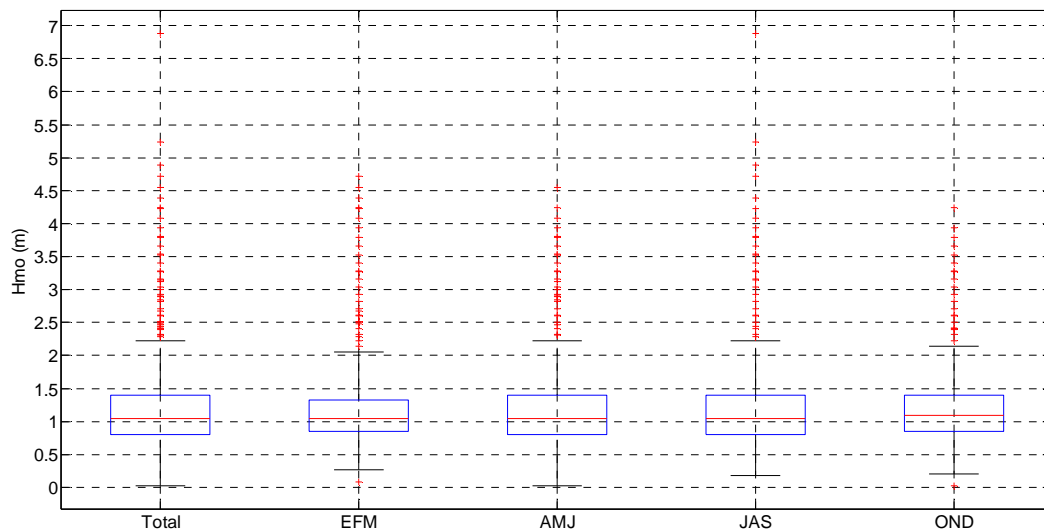


Figura 66.- Variación estacional de Hmo. Hidrovía

Se aprecia que en términos medios, la estación que presenta mayores alturas de ola es la primavera (OND) y la que presenta menores alturas de ola es el verano (EFM), siendo muy poca la diferencia entre una y otra. En cuanto a las direcciones, las rosas obtenidas para las distintas estaciones son similares, siendo las principales diferencias que el oleaje del Este es más frecuente en primavera y verano respecto a otoño (AMJ) e invierno (JAS), y que en otoño e invierno se observa una mayor presencia de olas mayores a 2 m provenientes del SW. Otra diferencia que se observa, es que si asociamos a los estados de mar provenientes del SE con alturas de ola entre 0.5 y 1 m como estados de mar donde predomina el mar de fondo, estos presentan una mayor frecuencia de ocurrencia en las estaciones frías (> 20% en AMJ y JAS) que en las estaciones cálidas (15 % en OND y EFM).

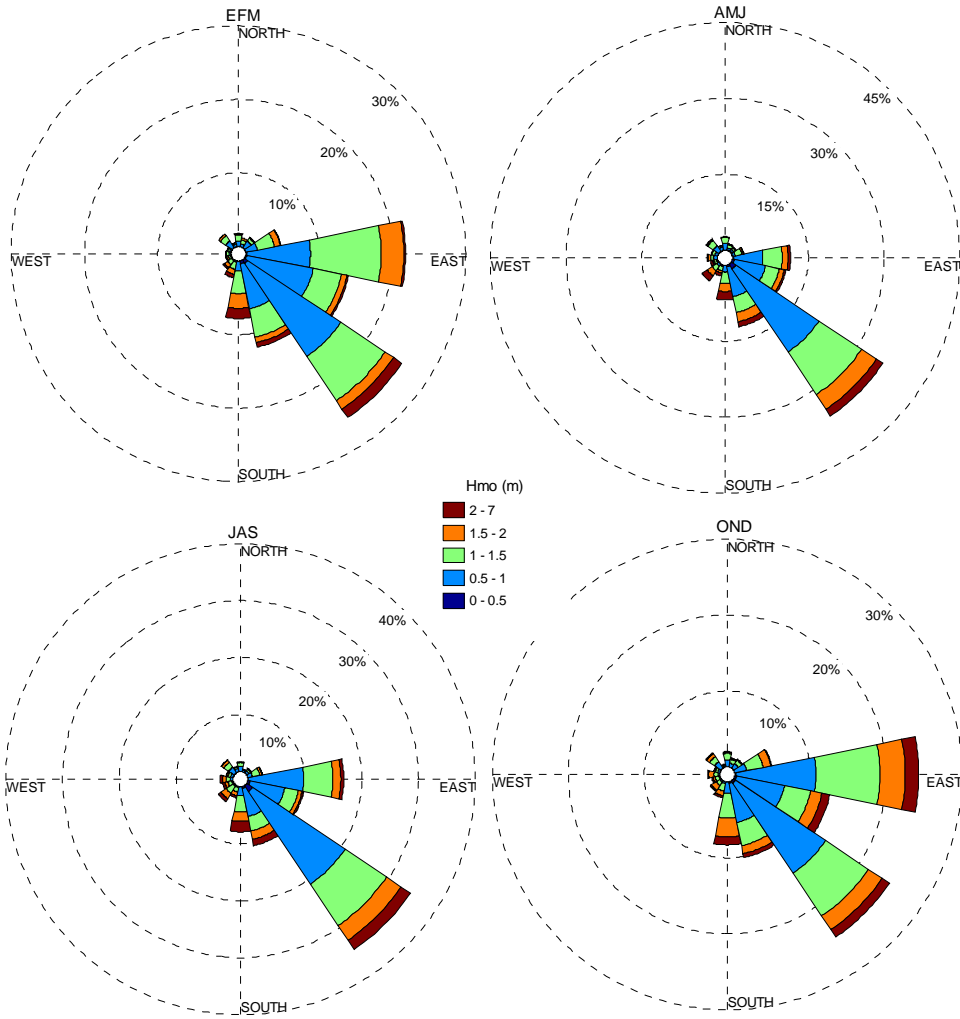


Figura 67.- Rosas de oleaje por estaciones. Hidrovía.

3.2.1.1.3 Potencial Undimotriz. Hidrovía.

Con la serie de datos presentada en el apartado anterior, se caracterizó el potencial undimotriz en Hidrovía. Para cada registro, la potencia fue estimada con la aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado (2.47). En la Tabla 26, en la Figura 68 y Figura 69 (izquierda) se presentan los resultados obtenidos en términos de potencia, mientras que en la Tabla 27 y en la Figura 69 (derecha) se presentan los resultados obtenidos en términos de energía media anual.

Tabla 26.- Descriptores estadísticos de la potencia del oleaje (kW/m). Hidrovía.

Promedio	Desviación Estandar	Máximo	Cuartil inferior	Mediana	Cuartil superior
5,0	6,8	248,3	1,8	3,0	5,4

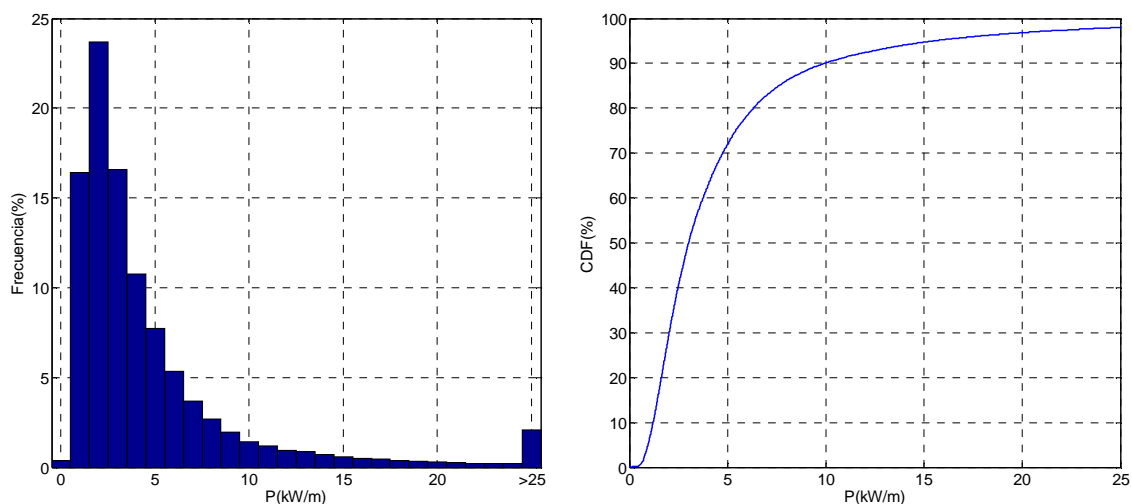


Figura 68.- Histograma (izq.) y distribución empírica de frecuencias acumuladas (der.). Potencia del oleaje en Hidrovía

La potencia undimotriz en Hidrovía se presenta la mayoría del tiempo entre valores de 2 y 5 kW/m, siendo 3 kW/m la mediana. Los estados de mar más energéticos (> 25 kW/m) tienen una frecuencia de ocurrencia de 2.5 % registrándose un valor máximo de casi 250 kW/m. La energía media anual estimada es de 44.3 MWh/m.

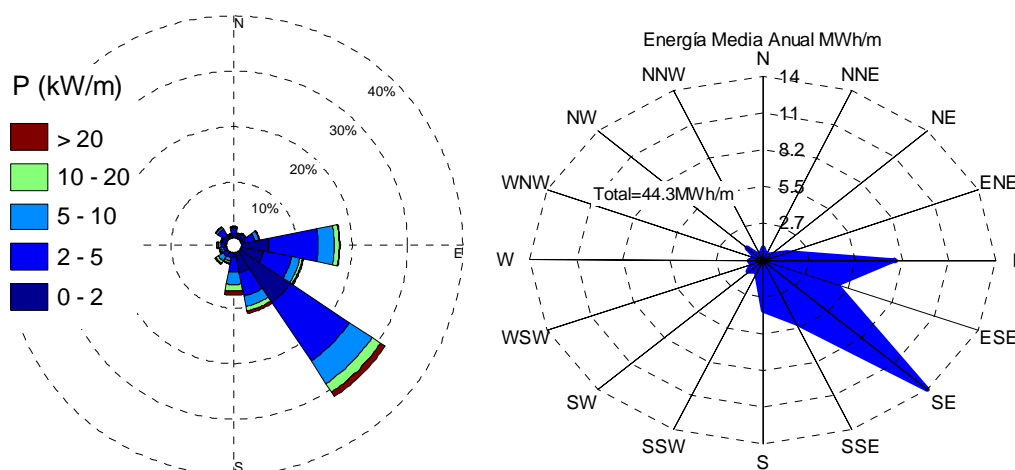


Figura 69. Rosa de potencia del oleaje (izquierda) y distribución direccional de la energía undimotriz media anual (derecha). Hidrovía.

Tabla 27.- Distribución de la energía undimotriz media anual (MWh/m) por altura de ola Hmo y período pico de los estados de mar. Hidrovía.

	Tp (seg)										Suma	
	0 - 2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	>18		
Hmo (m)												
0-0.5	0,00	0,03	0,03	0,10	0,25	0,25	0,13	0,07	0,01	0,02	0,88	
0.5-1	0,02	2,04	3,77	2,97	4,30	4,12	2,32	0,78	0,13	0,01	20,47	
1-1.5	0,01	0,62	7,72	1,48	0,89	1,67	1,50	0,36	0,03	0,00	14,30	
1.5-2	0,01	0,06	3,04	0,97	0,22	0,38	0,48	0,18	0,01	0,00	5,37	
2-2.5	0,00	0,01	0,38	0,79	0,08	0,18	0,11	0,03	0,02	0,00	1,60	
2.5-3	0,00	0,00	0,07	0,64	0,09	0,05	0,04	0,04	0,01	0,00	0,94	
3-3.5	0,01	0,00	0,00	0,20	0,12	0,05	0,07	0,02	0,00	0,00	0,47	
3.5-4	0,00	0,00	0,00	0,07	0,09	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,25	
> 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	
Suma	0,07	2,77	15,01	7,22	6,05	6,75	4,70	1,50	0,22	0,03	44,32	

Se observa que la energía proviene casi exclusivamente del cuadrante E-S, siendo la dirección SE la que más contribuye (30% del total). A su vez, se identifican dos grupos de estados de mar en los que se concentra gran parte del total de la energía. Uno de ellos está conformado por oleajes con altura de ola entre 0.5 y 1 m y período pico entre 8 y 14 segundos. Estos estados de mar aportan el 25% del total de la energía y por sus características se desprende que se trata de estados de mar en los que predomina el mar de fondo y por lo tanto tienen dirección SE. El otro grupo lo conforman estados de mar con períodos pico de entre 4 y 6 segundos y alturas de ola de entre 0.5 y 2 m. Este grupo contribuye con el 33% de la energía total y por sus características está asociado a estados de mar donde predomina el oleaje local. A diferencia del primer grupo, estos oleajes no presentan una dirección predominante, estando distribuidos en todo el cuadrante E-S.

En la Figura 70 y la Figura 71 se presenta un análisis de la variación estacional de la potencia del oleaje registrado en Hidrovía.

En las estaciones frías se obtuvo valores de potencia media levemente mayores y más concentrados en la dirección SE que en las estaciones cálidas donde el oleaje se presenta más distribuido en todo el cuadrante E-S.

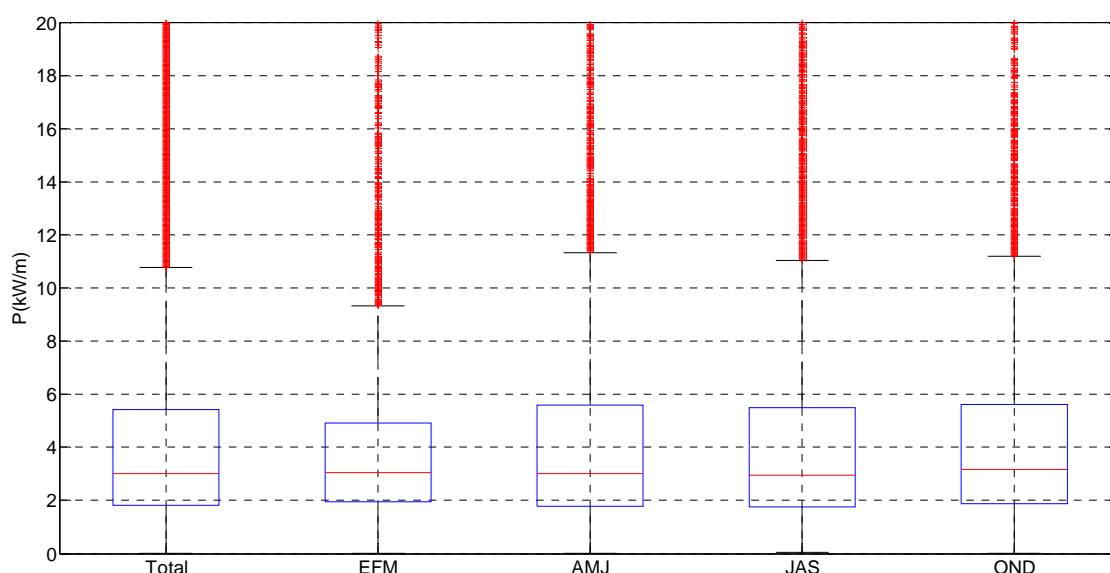


Figura 70.- Análisis estacional de la potencia del oleaje. Diagrama de cajas. Hidrovía.

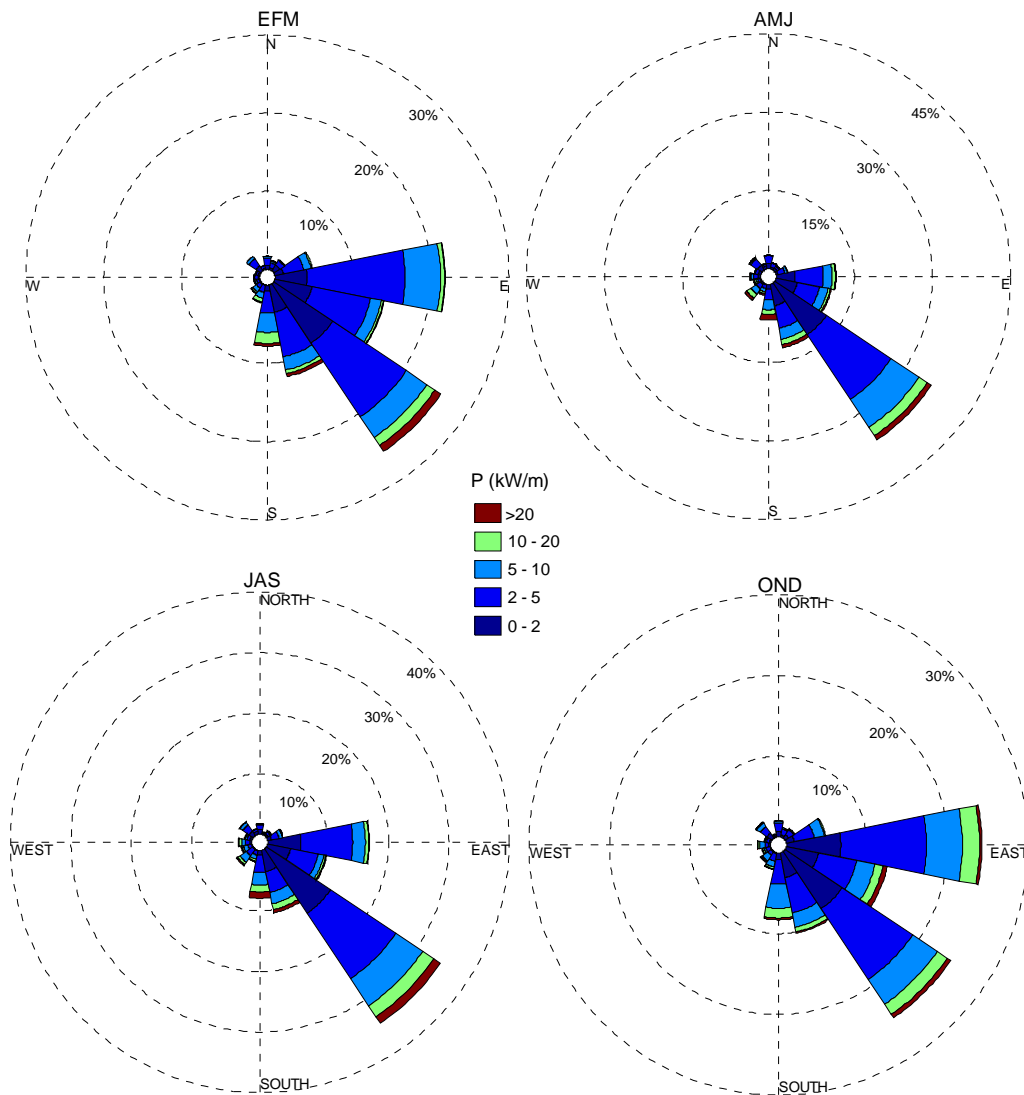


Figura 71.- Análisis estacional de la potencia del oleaje. Diagrama de rosas. Hidrovía

3.2.1.2 ADCP. Punta Brava.

3.2.1.2.1 Trabajos Antecedentes. Clima de olas en Punta Brava.

En el informe de actualización del proyecto en el marco del cual se instaló el instrumento (Piedra Cueva et. al. 2010) se presenta el clima de olas obtenido a partir de los datos medidos entre diciembre de 2003 y noviembre de 2009. El registro que analizaron contiene 9928 datos. Considerando que el instrumento toma un dato cada 3 horas, esto equivale a un registro continuo de 3 años y medio aproximadamente. Los principales resultados que se presentan en dicho informe, en lo que respecta al clima de olas en Punta Brava, se resumen en los siguientes puntos:

- El oleaje proviene mayoritariamente (80% aprox.) del cuadrante E-S, siendo las direcciones de procedencia más frecuentes ESE y SE.
- La mayoría de los estados de mar se corresponden a estados de mar donde predomina el oleaje local con alturas de ola significativa entre 0.3 y 0.6 m y períodos pico entre 4 y 6 segundos. El 83 % de los datos presenta períodos pico menores a 6 segundos.

- El 60% de los datos presentan alturas de ola significativa (H_s) menores a 0.6 m. H_s supera el valor de 1.23m el 5% del tiempo y el valor de 1.64 el 1% del tiempo. El valor de H_s máximo registrado es de 2.54 m.
- Los estados de mar en los que predomina el mar de fondo son poco frecuentes y presentan alturas de ola menores a 0.3 m.

Por otra parte Mosquera et.al (2012) analizaron los espectros bidimensionales registrados por el instrumento y propusieron un método para discriminar la porción del espectro correspondiente a oleaje local y la correspondiente a mar de fondo. El método que proponen considera las características del viento local que coexiste con el estado de mar analizado. Presentan los resultados correspondientes a un mes de datos en los cuales observan que la energía correspondiente al oleaje local es un orden superior que la correspondiente al mar de fondo.

3.2.1.2.2 Potencial Undimotriz. Punta Brava.

Se caracterizó el potencial undimotriz en Punta Brava a partir de la misma serie de datos que los trabajos antecedentes mencionados en el apartado anterior. Para cada registro, la potencia fue estimada con la aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado (2.47). En la Tabla 28, Tabla 29, Figura 72 y Figura 73 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 28.- Descriptores estadísticos de la potencia del oleaje (kW/m). Punta Brava.

Promedio	Desviación Estándar	Máximo	Cuartil inferior	Mediana	Cuartil superior
0,9	1,2	15,2	0,2	0,4	1,1

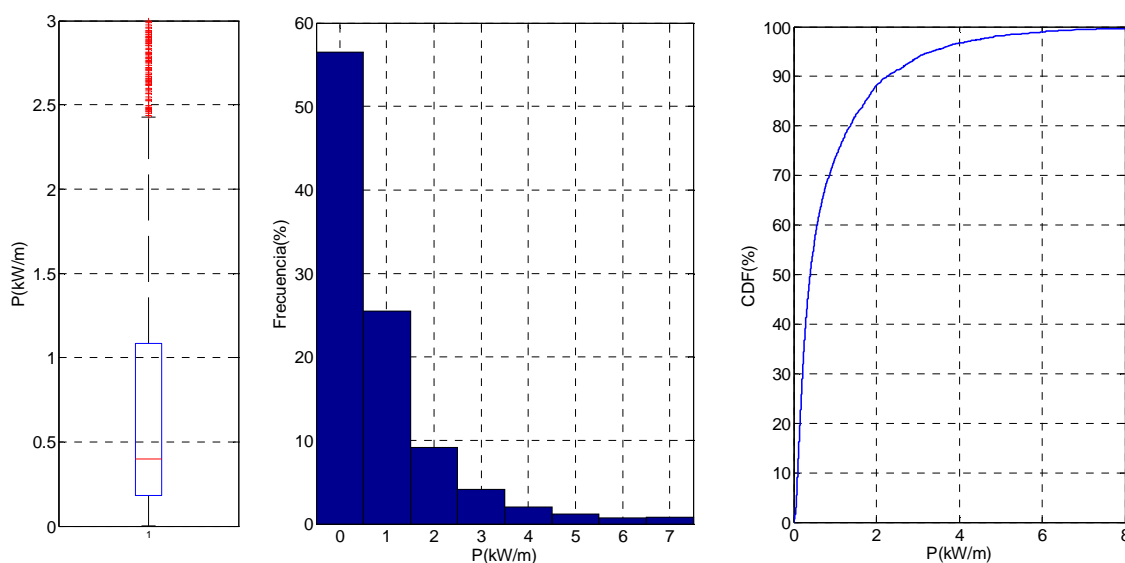


Figura 72.- Diagrama de caja (izq.), Histograma (centro) y distribución empírica de frecuencias acumuladas (der.). Potencia del oleaje en Punta Brava

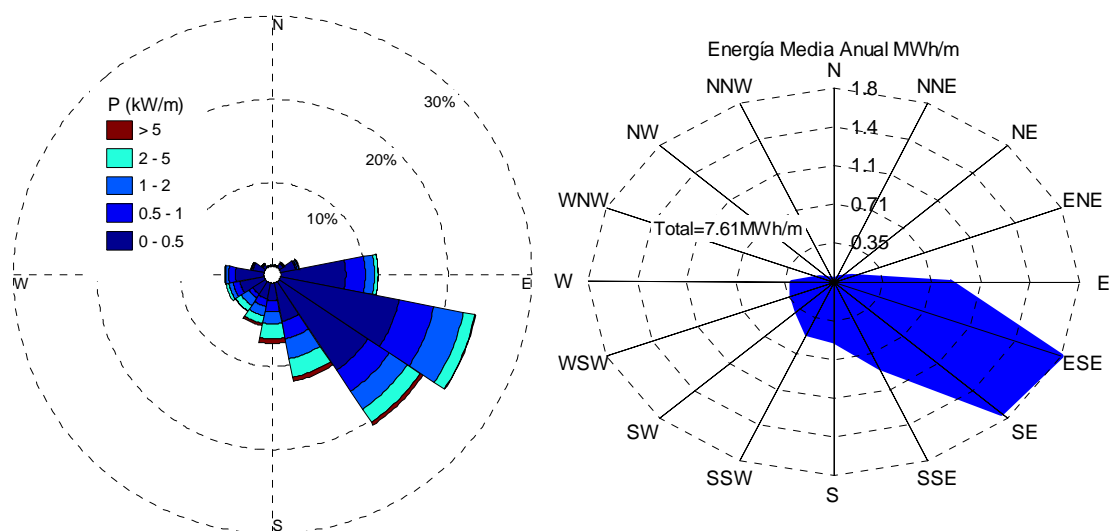


Figura 73.-Rosa de potencia del oleaje(izq.) y distribución direccional de la energía undimotriz media anual. Punta Brava.

Tabla 29.- Distribución de la energía undimotriz media anual (MWh/m) por altura de ola Hmo y período pico de los estados de mar. Punta Brava.

	Tp (seg)										Suma	
	0 - 2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	>18		
Hmo (m)												
0-0.5	0,00	2,03	1,02	0,19	0,30	0,27	0,50	0,07	0,01	0,01	4,41	
0.5 -1	0,00	0,82	1,56	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	2,41	
1-1.5	0,00	0,06	0,53	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	
> 1.5	0,00	0,00	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	
Suma	0,00	2,91	3,24	0,27	0,31	0,27	0,51	0,07	0,01	0,01	7,61	

La energía undimotriz media anual obtenida en Punta Brava es un orden menor a la obtenida en Hidrovía. El 90 % del tiempo la potencia del oleaje es menor a 2kW/m y el 55% del tiempo es menor a 0.5 kW/m. La mayoría de la energía corresponde al oleaje predominante en la zona, que se caracteriza por provenir de las direcciones SE y ESE, presentar alturas de ola menores a 1 m y períodos pico entre 2 y 6 segundos. La energía media anual estimada es de 7.6 MWh/m.

3.2.2 Sensoramiento remoto

El sensoramiento remoto del oleaje es realizado por instrumentos que se encuentran fuera del agua y a cierta distancia de la superficie del mar. Si bien existen casos en que estos instrumentos se han montado en torres de observación, barcos o aviones, la mayoría de la información de este tipo proviene de instrumentos montados en satélites. Las distintas técnicas existentes se basan en analizar la reflexión en la superficie del mar de luz infra-roja o en su espectro visible, o bien de la energía emitida por un radar. Entre ellas se distinguen las que consisten en el análisis de imágenes de las que se basan en mediciones altimétricas. A diferencia de las mediciones in-situ, el sensoramiento remoto permite obtener información con una mayor cobertura espacial. En este sentido, se destacan los datos satelitales altimétricos, los cuales desde su aparición en 1975 con el satélite GEOS-3 (Gower, 1976), constituyen una fuente de información del oleaje fiable y de cobertura global (Challenor, 2006).

A continuación se describe la técnica de altimetría con radar. Posteriormente se describen las principales características del proyecto ESA Globwave. Proyecto del cual se obtuvieron los datos satelitales con un procesamiento previo. Finalmente se comparan los datos satelitales disponibles con los datos obtenidos a partir de las mediciones in-situ.

3.2.2.1 Altimetría con radar.

Este método no registra olas individualmente, sino que permite inferir la rugosidad de la superficie del mar correspondiente a un área de algunos kilómetros. Esta rugosidad es cuantificada como la altura de ola significativa representativa del estado de mar en la zona iluminada por el radar.

La señal emitida por el radar es reflejada en la superficie del mar. La intensidad y forma de la señal reflejada dependen del estado de mar, así mientras un mar calmo se comporta como un espejo reflejando una señal similar a la emitida, un mar "picado" refleja una señal difusa y deformada.

Los satélites que portan radares altimétricos orbitan a una altitud del orden de los 1000 km, se los conoce como "*low earth orbiting* (LEO)". Estos satélites orbitan la Tierra entre 14 y 16 veces diarias y presentan distintas inclinaciones lo cual se vincula con su capacidad de cubrir mayores latitudes.

El objetivo primario de los radares altimétricos es medir el nivel de la superficie del mar. Para ello emiten un pulso y miden el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso y su recepción luego de ser reflejado en la superficie del mar. La deformación y dispersión de la señal reflejada depende de las características del estado de mar en la zona iluminada por el radar. Por lo tanto, a partir de la señal reflejada, es posible inferir características de dicho estado de mar y del viento con el que interactúa.

Los radares altimétricos son capaces de realizar medidas con una frecuencia aproximada de 1 Hz, viajando a una velocidad que dependerá de la altura del satélite pero que se encuentra en el entorno de los 6-7 km/s. Por lo tanto proporcionan un dato cada 6-7 km de su recorrido.

La Figura 74 muestra una idealización de la señal reflejada. El gráfico corresponde a la potencia de la señal en función del tiempo. En este tipo de gráficos la escala temporal son nano segundos.

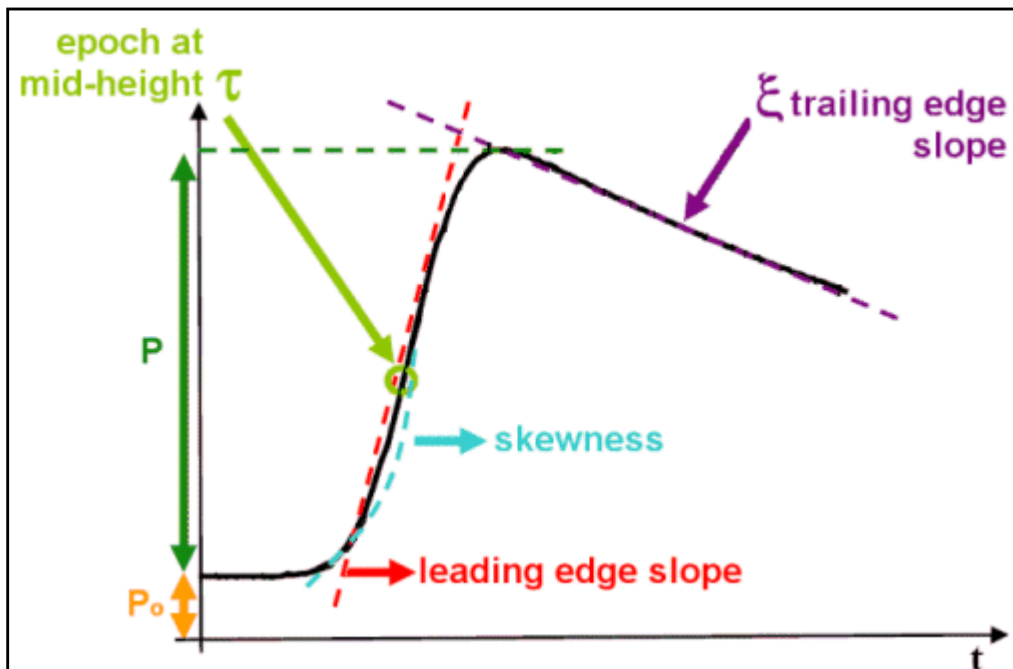


Figura 74.- Idealización de la señal reflejada. (Obtenida de ESA Radar Altimetry Tutorial).

La pendiente de la rama inicial del pulso (*leading edge slope*) depende del tiempo transcurrido entre la reflexión en las crestas y valles del oleaje, y por ende es el parámetro empleado para inferir la altura de ola significativa. Cuando menor es esta pendiente, mayor es la altura de ola significativa. Una relación entre la intensidad de la señal emitida y la intensidad total reflejada (P verde) permite definir el *Backscatter Coefficient* (σ_0). Este coeficiente depende de las olas presentes en el estado de mar cuyos períodos están comprendidos entre 0.1 y 1 segundos y sus longitudes de onda entre 1 y 10 cm (*capillary-gravity waves*). Estas olas están vinculadas con el viento que se encuentra soplando localmente y por ende σ_0 es utilizado en algoritmos empíricos para inferir la velocidad del viento. El parámetro *skewness* (turquesa) es empleado como indicador de las no-linealidades, el tiempo *epoch at mid-height* es utilizado para estimar el nivel medio del mar, la rama final del pulso (*trailing edge slope*) da información sobre la pérdida de alineación con el Nadir y finalmente la intensidad de base (P_0) constituye ruido de fondo.

Los radares altimétricos trabajan en las bandas de frecuencias de las microondas: Ka (35 GHz), Ku(13.6 GHz), C(5.3 GHz) y S(3.2 GHz). Mayor frecuencia implica mayor intensidad de la señal y por lo tanto mayor precisión, pero la señal es más sensible a ser distorsionada por factores atmosféricos como la lluvia. La banda usualmente empleada es la Ku por ser un buen compromiso entre intensidad de la señal y sensibilidad ante los factores atmosféricos.

En la Tabla 30 se resumen los distintos parámetros que se pueden determinar a partir de un radar altimétrico montado en un satélite.

Tabla 30.-Parámetros del oleaje que se obtienen de la altimetría con radar.

Parámetro	Modo de Obtención
Altura de ola significativa (Hs)	Medida directa
<i>Backscatter Coefficient</i> (σ_0)	Medida directa
Velocidad del viento	Se infiere a partir de σ_0
Período medio <i>Zero upcrossing</i> (Tz)	Se infiere a partir de Hs y σ_0

Los principales problemas de medición están asociados a la presencia de islas o hielos en la zona iluminada por el radar. También se detectaron problemas debido a la presencia de lluvias intensas o cuando el mar se presenta calmo. Por otra parte, el procesamiento de la información que se realiza a bordo del satélite detecta si la medida es hecha en continente o en mar, pero al cruzar la costa del continente hacia el mar, existe una demora en detectar que se está sobre el mar, lo cual puede afectar los datos tomados cerca de la costa.

3.2.2.2 Proyecto ESA Globwave.

El proyecto ESA Globwave es una iniciativa de la Agencia Europea Espacial (ESA), subsidiado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES) francés, que tiene el propósito de facilitar el uso de datos de oleaje satelitales para usos científicos, operacionales y comerciales. El desarrollo del proyecto es liderado por la empresa inglesa Logica con la colaboración de las instituciones: CLS, Ifremer, SatOC y NOCS.

A los efectos de facilitar el uso de datos satelitales de oleaje, facilitar la comparación con resultados de modelos y estimular el desarrollo de la asimilación de datos satelitales por parte de los modelos, el proyecto entre otros desarrollos, posibilita el acceso a través de la página web: www.globwave.org a la base de datos L2P (*level 2 preprocessed*). La base está conformada por datos provenientes de distintos satélites, uniformizados a un mismo formato y con información sobre la calidad del dato. Los datos en L2P se clasifican según su forma de obtención: altimétricos o radar de apertura sintética (SAR), o bien por tratarse de datos históricos o instantáneos (NRT). Los datos NRT están disponibles para ser descargados unas pocas horas luego de su obtención, mientras que los datos históricos contienen información de 8 satélites y permiten obtener información continua durante el período 1991-2009. En la Tabla 31 se presenta información sobre estos 8 satélites.

Tabla 31.-Características de los datos históricos de la base de datos L2P.

Satélite	Tipo de medida	Período disponible	Referencia oficial
ESA ERS-1	Altimetría	1/2/92 -2/6/96	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA ERS-2	Altimetría	15/5/95-22/6/2003	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA ERS-1	SAR	1/91-12/96	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA ERS-2	SAR	1/96-12/2010	CERSAT http://cersat.ifremer.fr
ESA Envisat	Altimetría	26/8/2002-22/3/2008	ESA www.esa.int
CNES/NASA Topex/POSEIDON	Altimetría	25/9/92 -8/10/05	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC http://podaac.jpl.nasa.gov
CNES/NASA Jason1	Altimetría	15/01/2002 -12/2010	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC http://podaac.jpl.nasa.gov
CNES/NASA Jason2	Altimetría	12/2008 -12/2010	AVISO www.aviso.oceanobs.com PODAAC www.eumetsat.int
US Navy GEOSAT	Altimetría	31/3/1985- 30/12/1989	NOAA www.noaa.gov
US Navy/NOAA GEOSAT Follow On	Altimetría	8/1/2000-23/7/2008	NOAA www.noaa.gov

Para el análisis de los resultados del modelo se utilizaron los datos históricos altimétricos de la base de datos L2P del proyecto Globwave. Las características regionales de estos datos se presentan a continuación, mediante la localización de los datos a través de las trayectorias de

cada uno de los satélites (figuras 75,77,79,81,83,85, 87 y 89) y la presentación de sus ciclos típicos (figuras 76,78,80,82,84,86,88 y 90).

En la base de datos L2P los datos son clasificados en: "probable buena medida", "sospechosos" y "probable mala medida". De aquí en más, en los resultados que se presentan y que involucran datos satelitales, se consideró únicamente los datos catalogados como "probable buena medida".

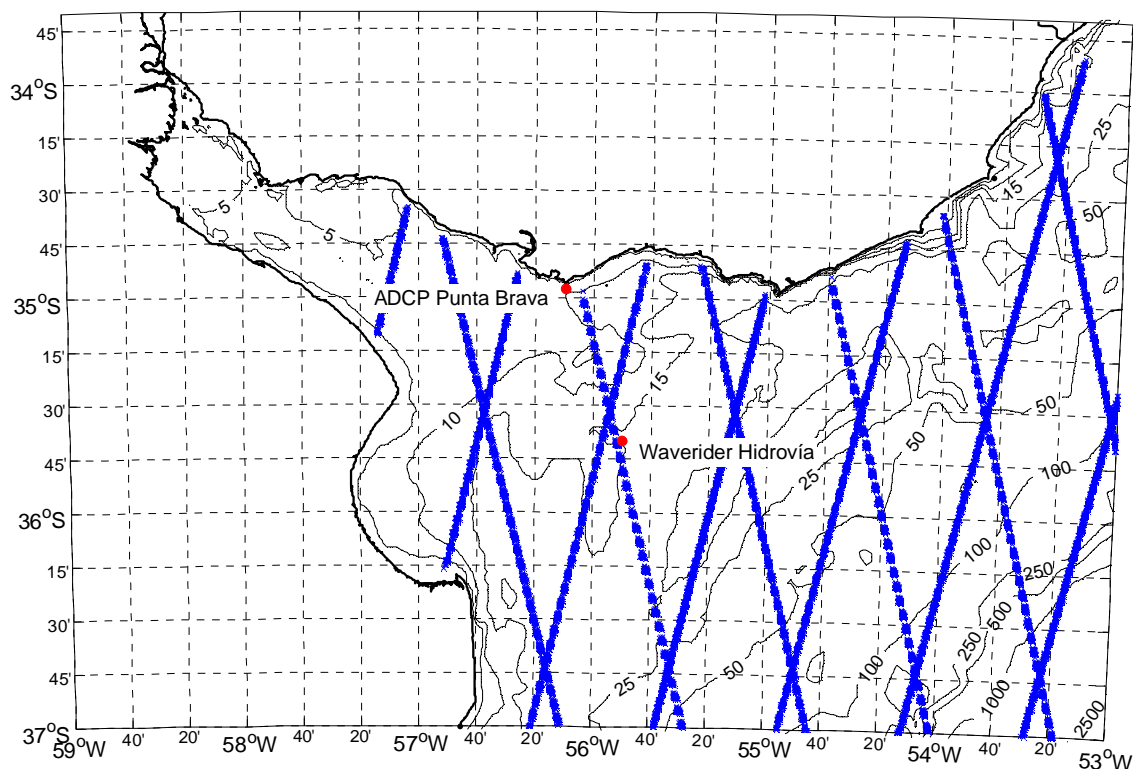


Figura 75.- Trayectoria del satélite Envisat.

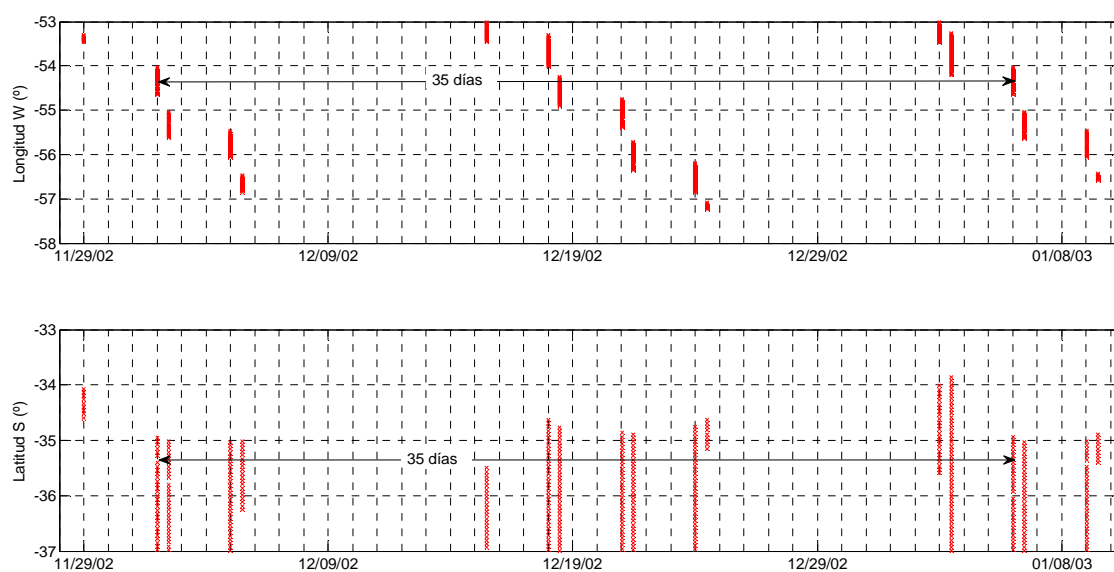


Figura 76.- Ciclo típico del Satélite Envisat.

El ciclo del satélite Envisat es de 35 días. Se observa la presencia de datos en las inmediaciones de la boya de Hidrovía y próximos al ADCP de Punta Brava, disponibles para ser comparados

con los registros de estos instrumentos. Se destaca la presencia de datos de probable buena calidad próximos a la costa.

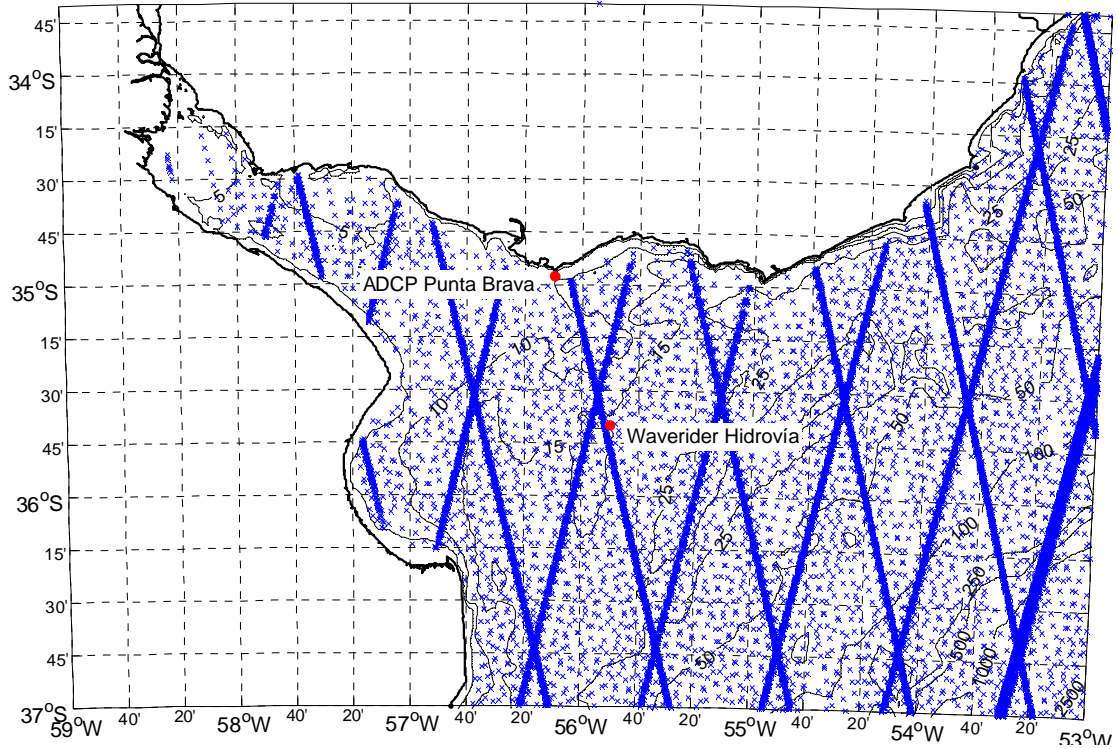


Figura 77.- Trayectoria del satélite Ers1.

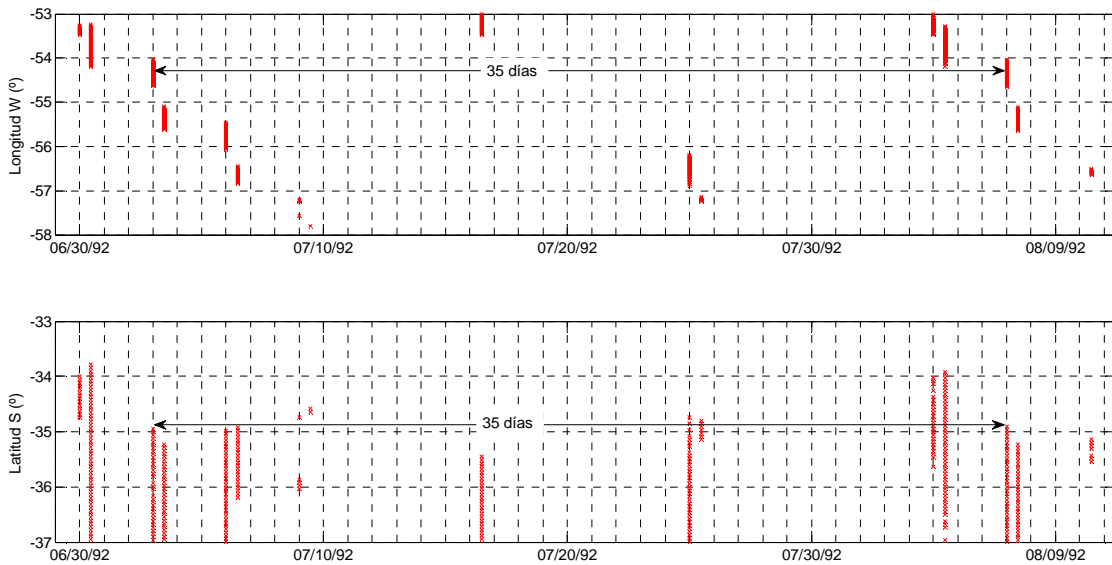


Figura 78.-Ciclo típico del Satélite Ers1.

El ciclo del satélite Ers1 también es de 35 días y las trayectorias son similares a las del Envisat. Se observan algunos puntos dispersos que no se identifican con una trayectoria determinada. Aunque las trayectorias se aproximen a los puntos de medición (Hidrovia y Punta Brava), los períodos de datos no son coincidentes y no se pueden comparar. También se destaca la presencia de datos de probable buena calidad próximos a la costa.

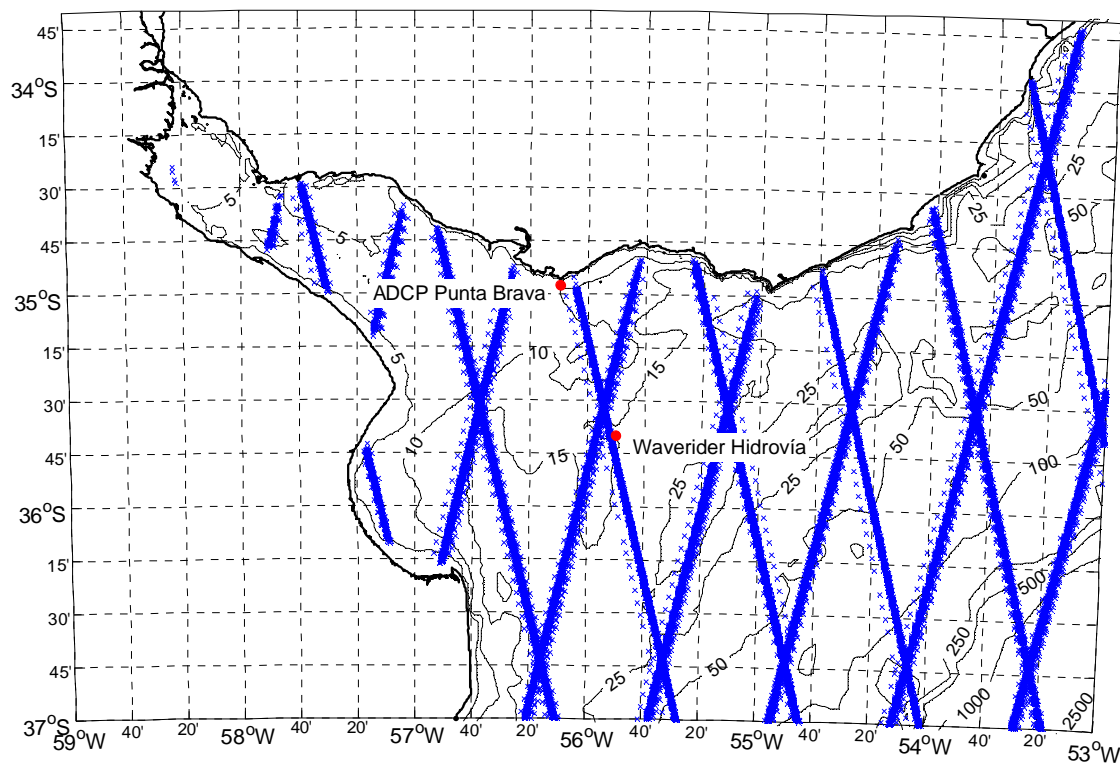


Figura 79.- Trayectoria del satélite Ers2.

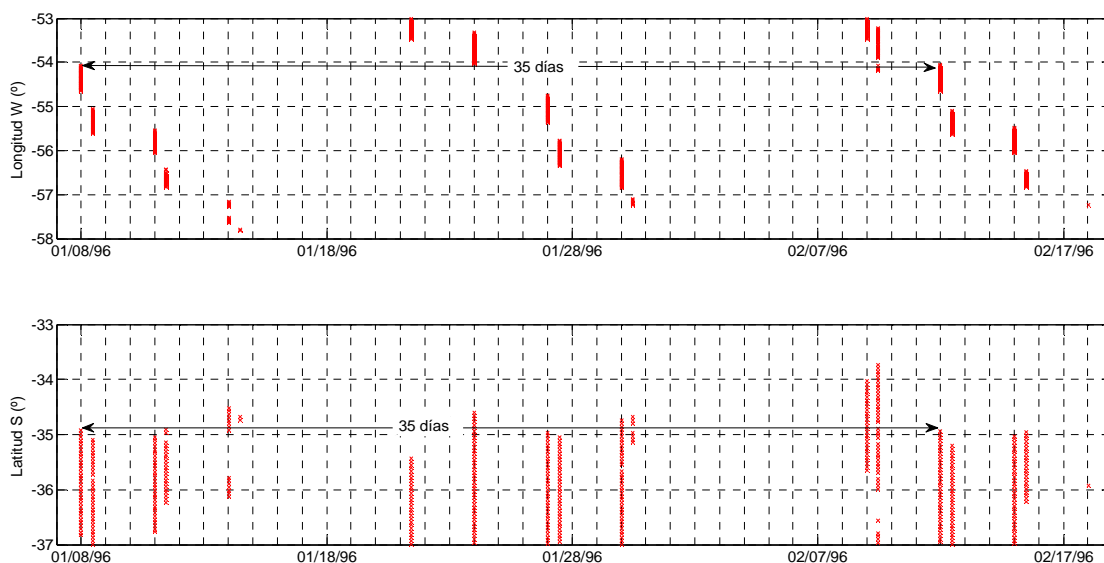


Figura 80.- Ciclo típico del Satélite Ers2.

Presenta el mismo ciclo (35 días) y trayectorias que los otros dos satélites de la Agencia Espacial Europea (ESA): Ers1 y Envisat. Si bien no se observan datos dispersos como en el satélite Ers1, se observan que algunos puntos se apartan levemente de las trayectorias. Se observa la presencia de datos cerca de los puntos de medición pero debido a los períodos de los registros solo se dispone de datos para comparar en Hidrovía. También se destaca la presencia de datos de probable buena calidad próximos a la costa.

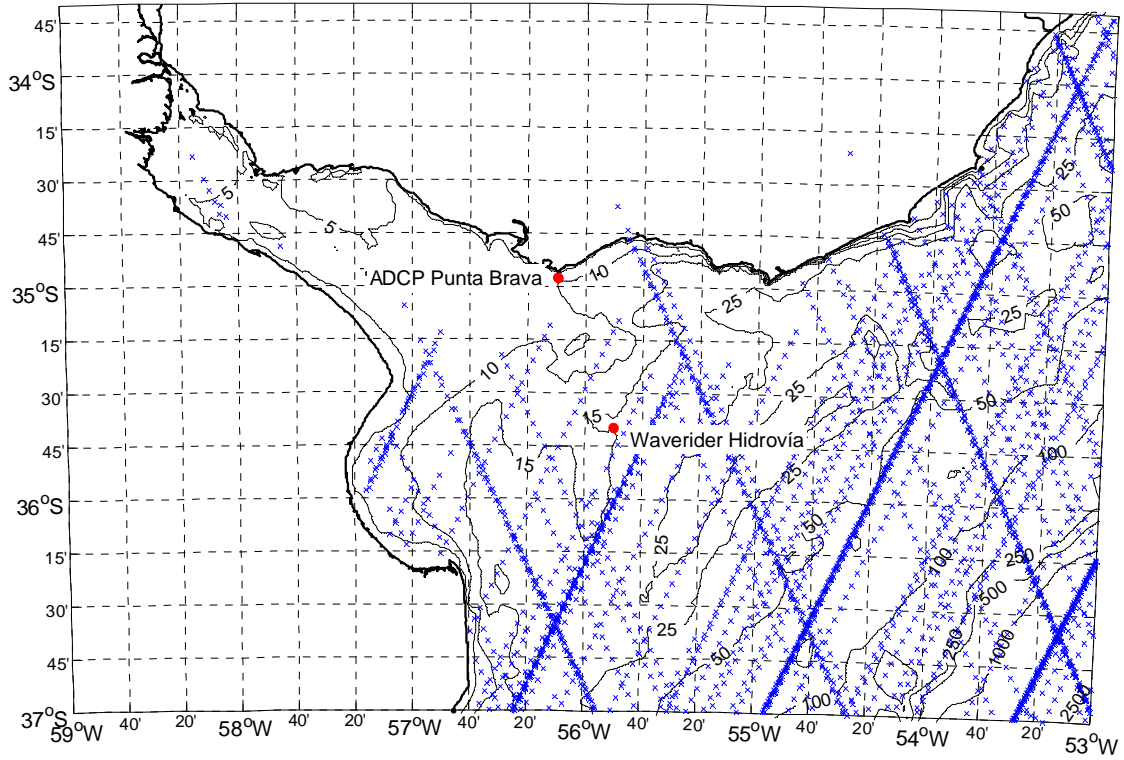


Figura 81.- Trayectoria del satélite Geosat.

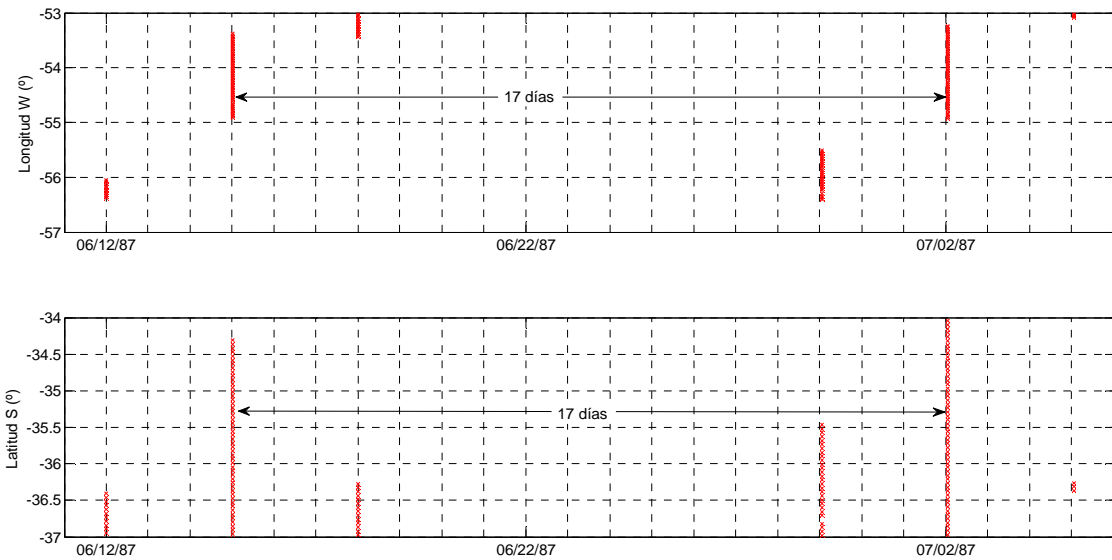


Figura 82.- Ciclo típico del Satélite Geosat.

El ciclo del satélite Geosat es de 17 días y se observa que muchas trayectorias se apartan de las trayectorias principales. Si bien se observan algunos datos próximos a Hidrovía los períodos de los registros no son coincidentes. Son los únicos datos que se dispone de antes de 1990.

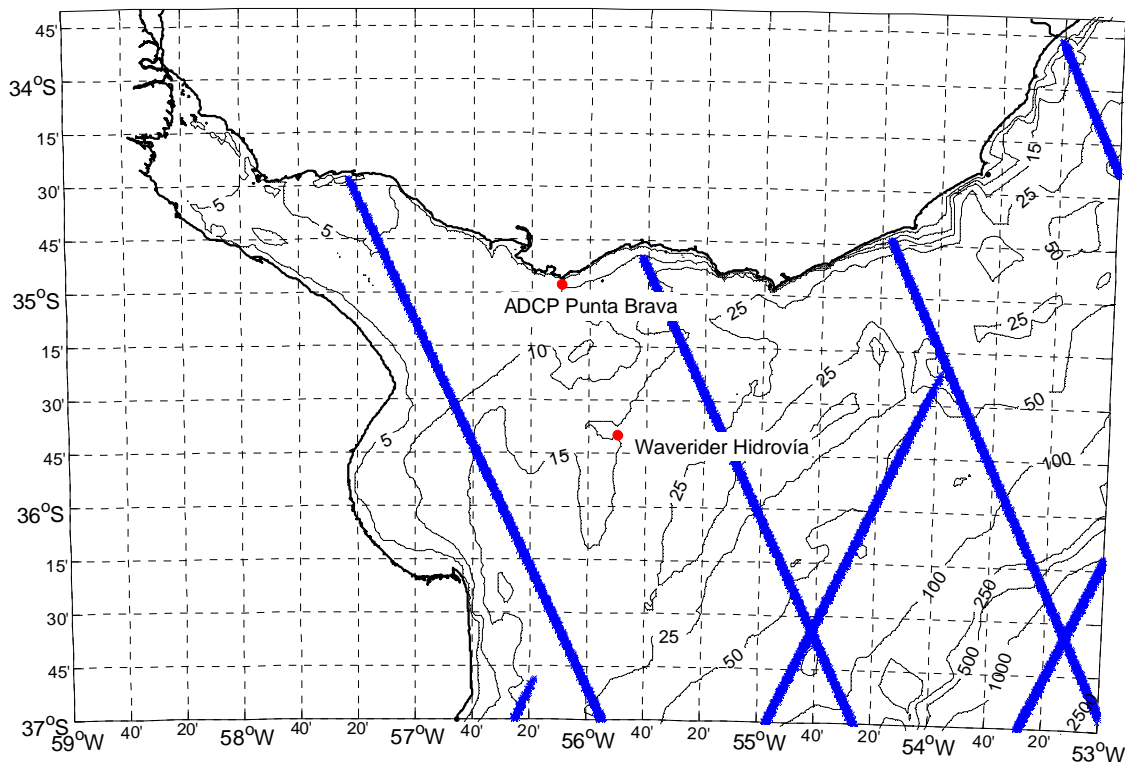


Figura 83.- Trayectoria del satélite Gfo.

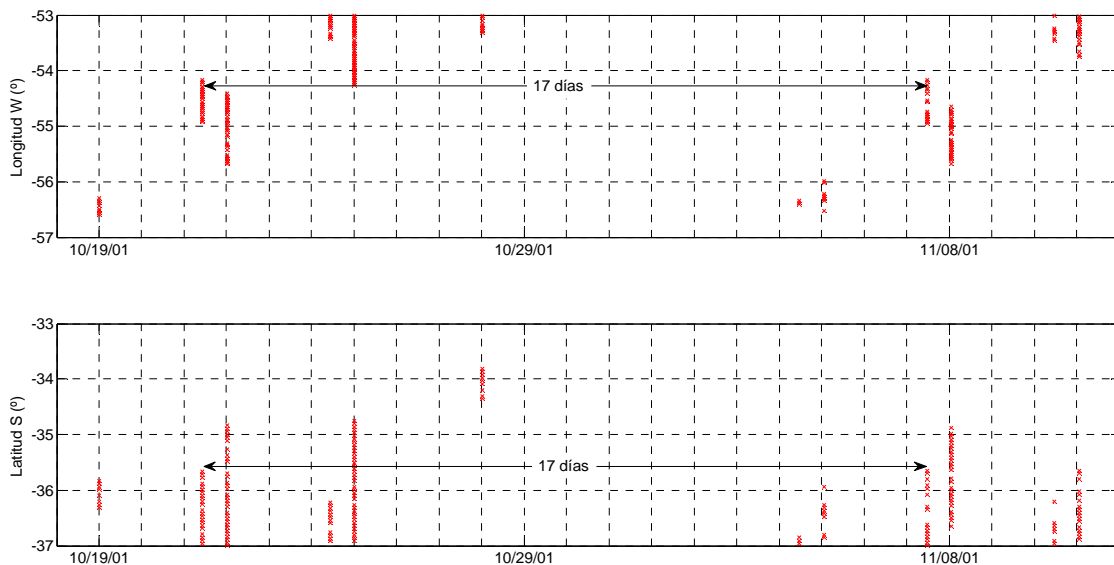


Figura 84.- Ciclo típico del Satélite Gfo.

Al igual que su predecesor Geosat, el satélite Gfo presenta un ciclo de 17 días. A diferencia del primero, los datos se presentan en trayectorias bien determinadas. Las trayectorias que aparecen truncadas se debe a que los datos si bien fueron tomados, son catalogados como "probablemente de mala calidad" en la base de datos L2P. Se destaca la presencia de datos próximos a la costa. Los datos se presentan demasiado lejos de los puntos de medición como para ser comparados.

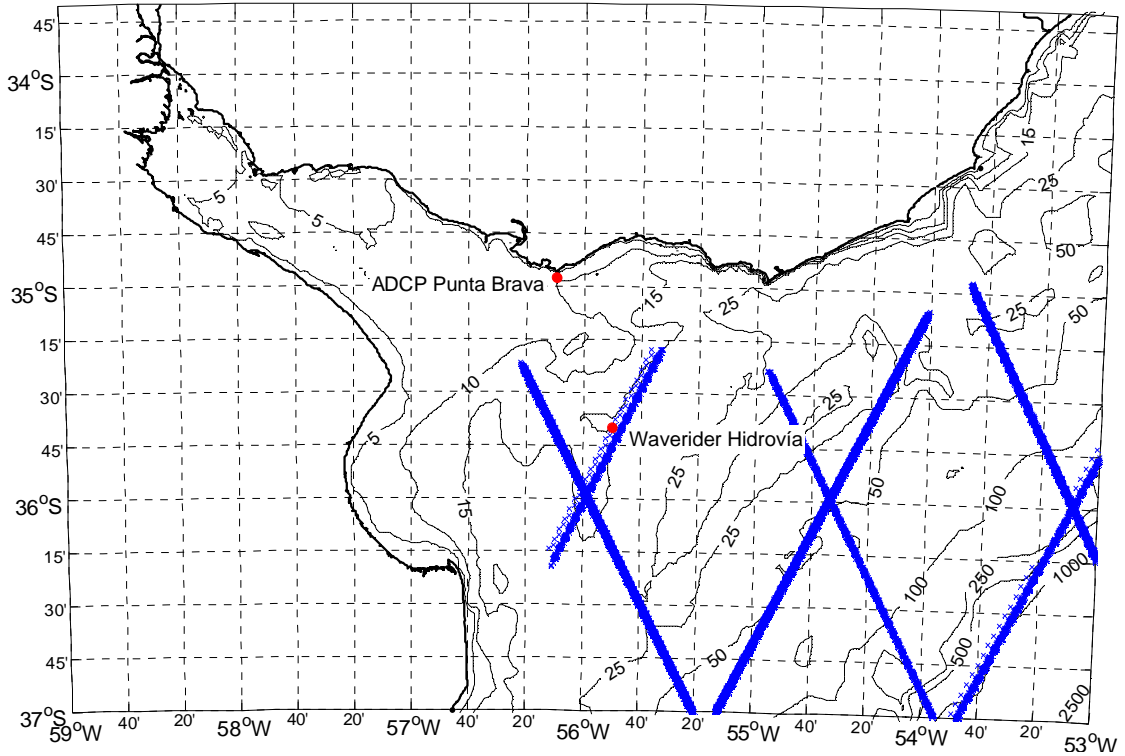


Figura 85.- Trayectoria del satélite Jason1.

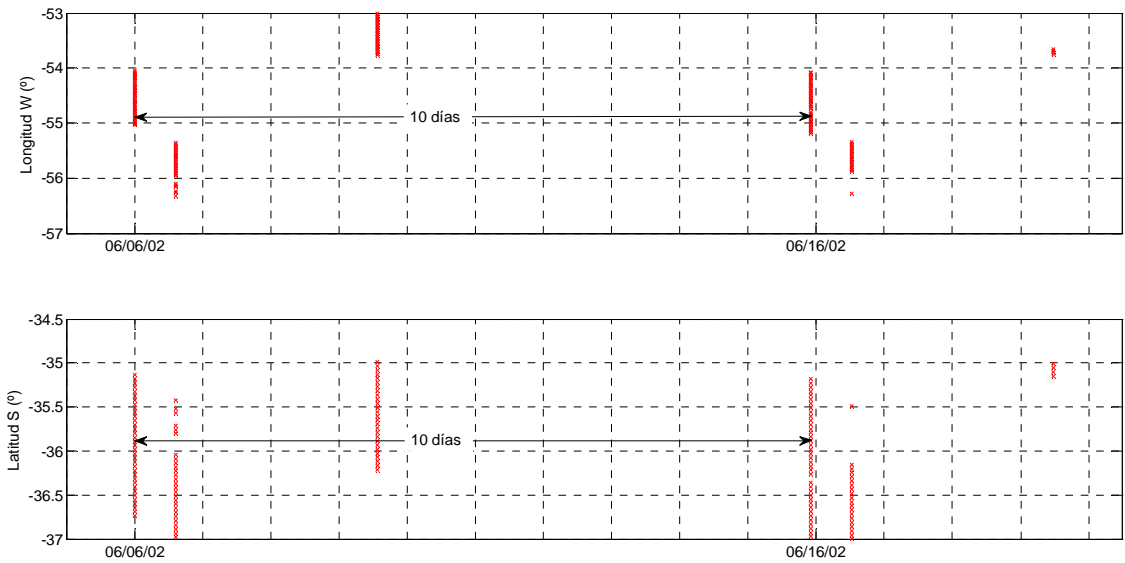


Figura 86.- Ciclo típico del Satélite Jason1.

El satélite Jason1 presenta un ciclo de 10 días con datos sobre trayectorias bien definidas pero sin datos de buena calidad cercanos a la costa. Se observan datos disponibles para ser comparados con el registro de Hidrovia.

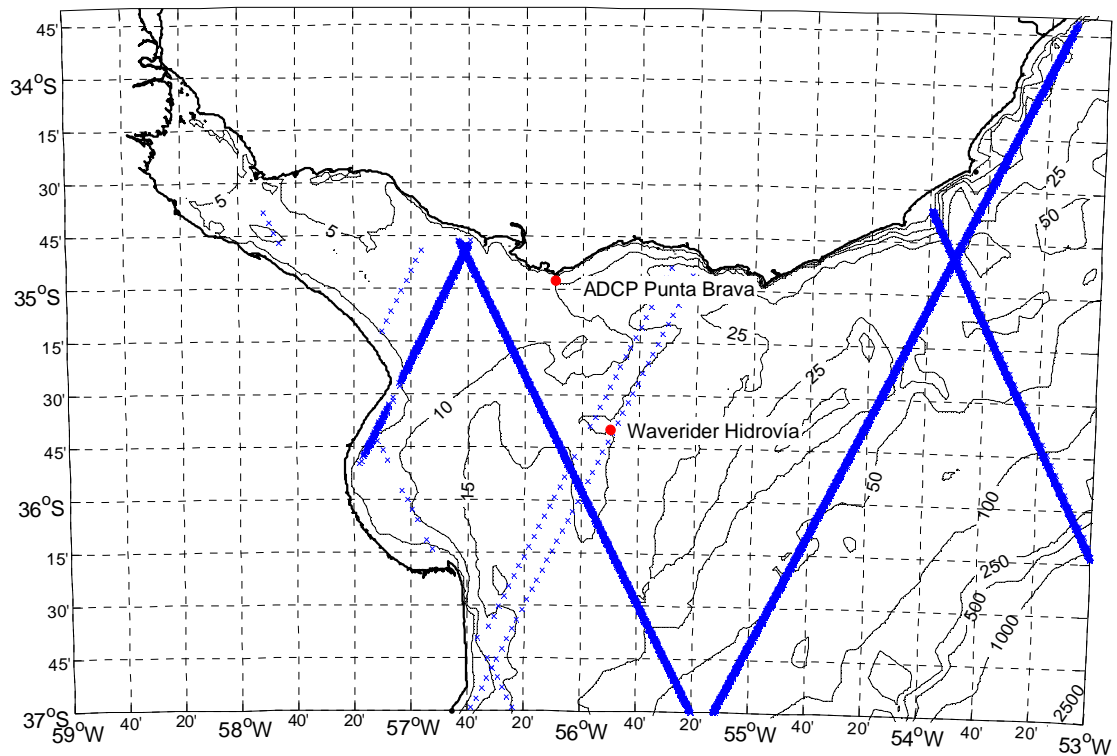


Figura 87.- Trayectoria del satélite Jason2.

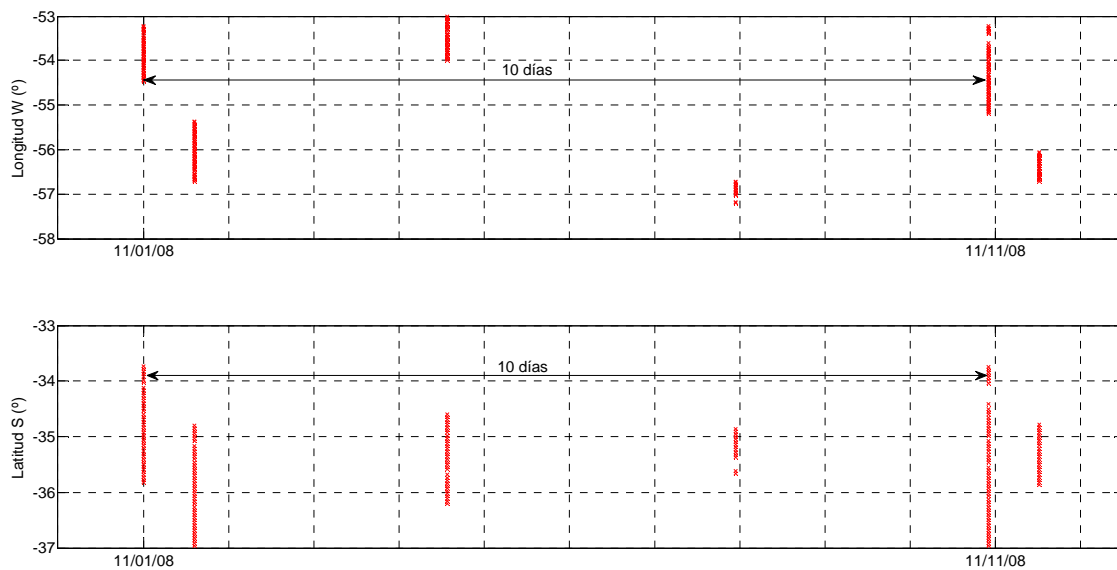


Figura 88.- Ciclo típico del Satélite Jason2

Al igual que el satélite Jason 1, presenta un ciclo de 10 días, presenta datos de probable buena calidad cercanos a la costa, pero no presenta datos plausibles de ser comparados con los registros de Hidrovia y Punta Brava, por la distancia a estos puntos y porque las series no coinciden temporalmente.

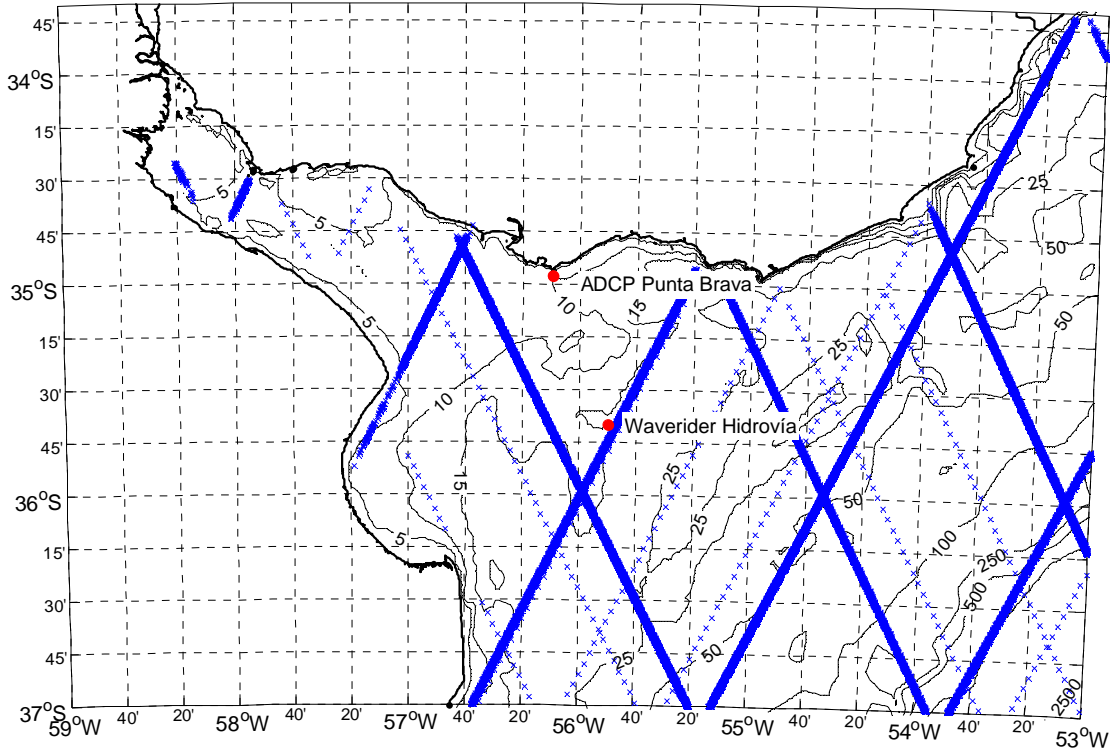


Figura 89.- Trayectoria del satélite Topex.

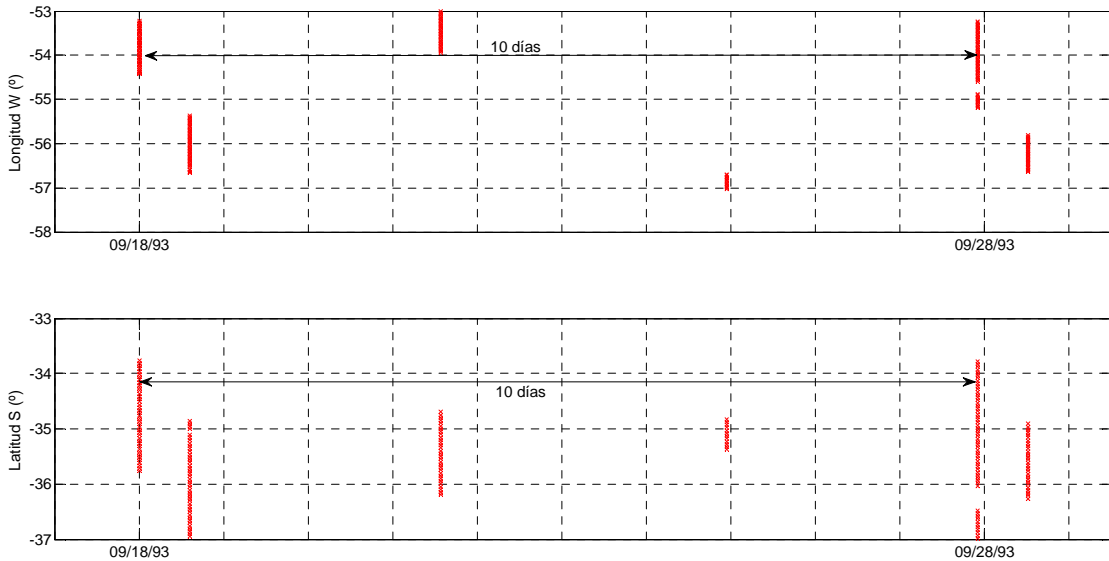


Figura 90.- Ciclo típico del Satélite Topex

El satélite Topex presenta un ciclo de 10 días con datos sobre trayectorias bien definidas con datos de buena calidad cercanos a la costa. Se observan datos disponibles para ser comparados con el registro de Hidrovía.

3.2.2.3 Comparación de los datos satelitales con las mediciones in situ

Se buscaron los datos satelitales correspondientes a estados de mar registrados por los instrumentos de medición in-situ. Para ello se implementó un algoritmo de búsqueda que comienza definiendo regiones de 30 km x 30 km aproximadamente, centradas en los puntos de medición (Figura 91) y descarta los datos satelitales que caen fuera de estas regiones. Luego recorre la serie de datos medidos in-situ, y para cada dato busca entre los datos

satelitales que quedaron, si alguno fue tomado en el mismo instante de tiempo más menos una hora y media. Finalmente, si existen varios datos satelitales que cumplen esta condición, se escoge el de mayor cercanía espacial. Es decir, el algoritmo considera que dos medidas registraron el mismo estado de mar si éstas se corresponden con puntos que no distan más de 15 km entre sí y con instantes de tiempo que no difieren en más de una hora y media entre sí. Si hay más de un dato satelital que cumple con esta condición, se queda con aquel de mayor cercanía espacial.

En base a esta metodología se obtuvieron para comparar con Hidrovía, 157 datos del satélite Envisat, 36 datos del satélite Ers2 y 156 datos del satélite Topex. Mientras que para comparar con Punta Brava se obtuvieron solamente 8 datos del satélite Envisat.

Los datos del satélite Jason 1 de probable buena calidad que se encuentran próximos a Hidrovía son posteriores a la fecha de finalización del registro de Hidrovía. El criterio adoptado de proximidad espacial para la comparación se flexibilizó a los efectos de poder utilizar los datos del satélite Jason 1 correspondientes a la trayectoria que se encuentra al oeste de Hidrovía (Figura 85). La distancia entre los puntos correspondientes a los nuevos datos e Hidrovía es de 45 km aproximadamente. De esta forma se obtuvieron 308 datos del satélite Jason 1 para comparar con el registro de Hidrovía.

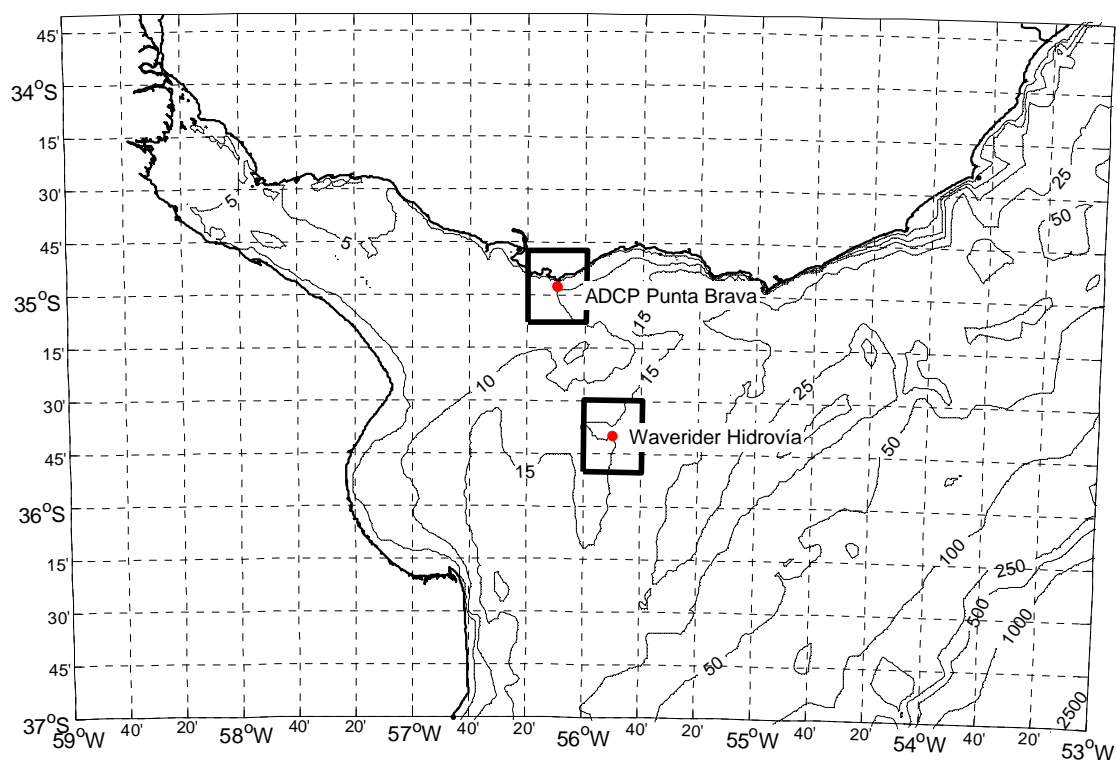


Figura 91.- Regiones que delimitan los datos satelitales considerados en la comparación.

En la Figura 92, Figura 93 y Figura 94 se presenta, para cada uno de los satélites, la comparación entre la altura de ola significativa registrada por los satélites y la registrada por la boya en Hidrovía. Considerando el dato en Hidrovía como dato de referencia y el dato satelital como estimado, se calculó, el error medio (ME), el error medio absoluto (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación (r). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 32.

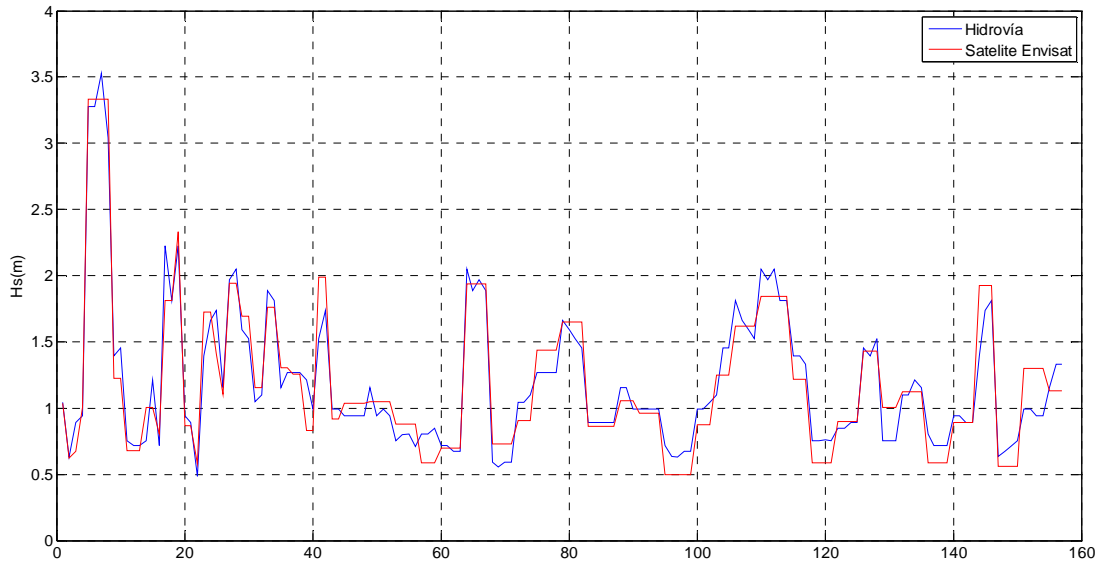


Figura 92.- Satélite Envisat vs. Hidrovía. Altura de ola significativa.

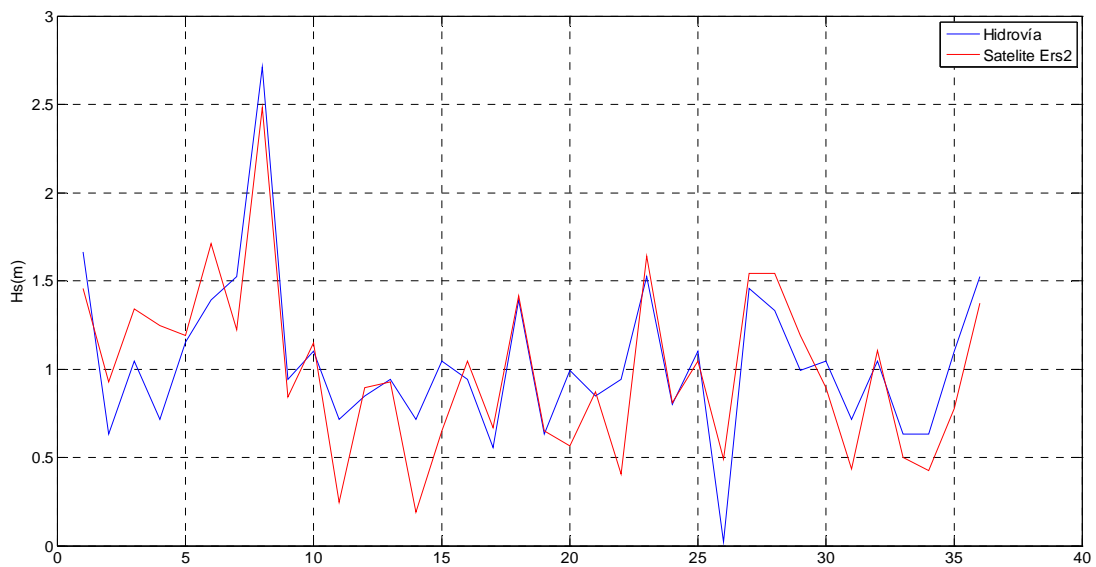


Figura 93.- Satélite Ers2 vs. Hidrovía. Altura de ola significativa.

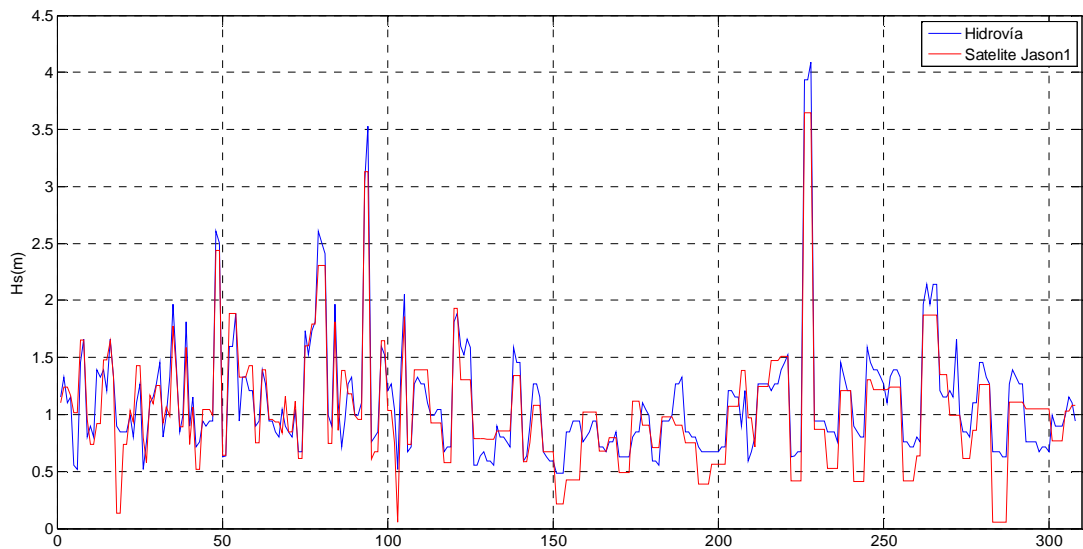


Figura 94.- Satélite Jason1 vs. Hidrovía. Altura de ola significativa.

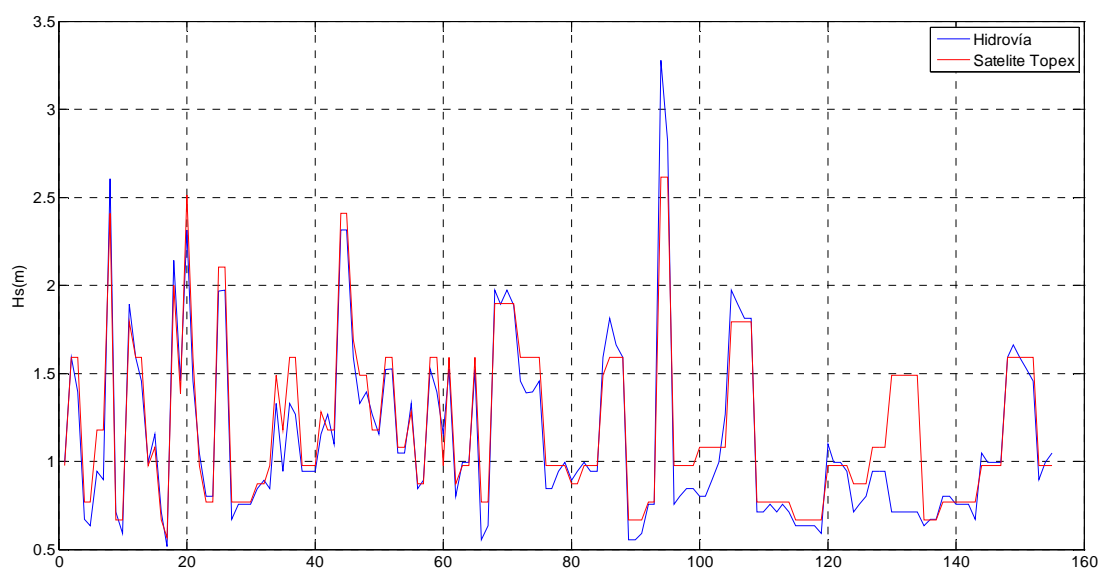


Figura 95.- Satélite Topex vs. Hidrovía. Altura de ola significativa

Tabla 32.- Datos satelitales vs Hidrovía. Diferencias en la altura de ola significativa.

	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	r
Envisat	-0.01	0.12	0.16	0.96
Ers2	-0.04	0.21	0.27	0.84
Jason1	-0.07	0.18	0.23	0.91
Topex	0.06	0.11	0.18	0.93

Los resultados obtenidos muestran una gran concordancia entre los datos satelitales de altura significativa y los datos medidos en Hidrovía. Lo que verifica la capacidad de los radares altimétricos para medir H_s y valida el uso de estos datos para contrastar con los resultados obtenidos en la modelación.

En la Figura 96 y la Tabla 33 se muestran los resultados obtenidos al comparar los datos satelitales con las medidas en Punta Brava.

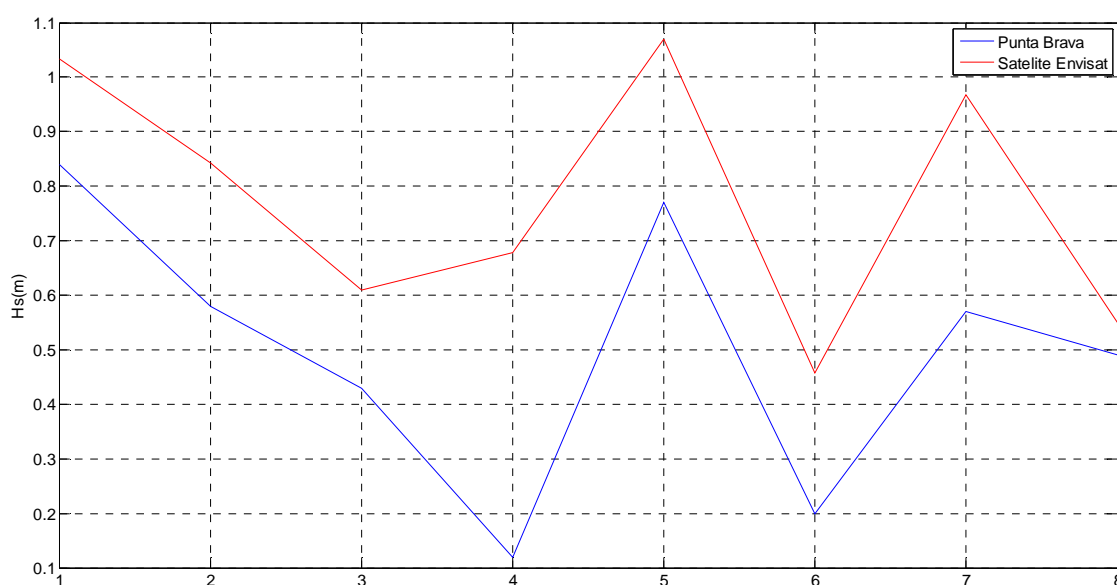


Figura 96.- Satélite Envisat vs. Punta Brava. Altura de ola significativa.

Tabla 33.- Datos satelitales vs Punta Brava. Diferencias en la altura de ola significativa.

	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	r
Envisat	0.27	0.27	0.30	0.80

Se observa una buena correlación y que los datos satelitales son, en términos medios, 30 cm mayores que los medidos en Punta Brava. Esto es consistente con el hecho de que los datos satelitales se corresponden a puntos ubicados algunos kilómetros mar adentro de Punta Brava (Ver Figura 75), y dada la poca profundidad de la zona es razonable obtener dicha diferencia debido a la disipación de energía del oleaje por su interacción con el fondo.

Si bien el período no constituye una medida directa de los datos altimétricos, puede ser estimado a partir de la altura de ola significativa y el *Backscatter coefficient* (σ_0) medidos por el radar altimétrico. Para ello se utilizó la siguiente expresión:

$$T_z = (((\xi - 5.78)/(\xi + (W_s/(H_s * ((W_s/H_s) + H_s)))) + (H_s + 5.7)) \quad [3.2]$$

Donde T_z es el período medio, W_s la velocidad del viento, H_s la altura de ola significativa y ξ constituye un estimador de la edad del oleaje, calculado a partir de H_s y W_s mediante la expresión propuesta por Fu y Glazman (1991):

$$\xi = 3.25(H_s^2 g^2 / W_s^4)^{0.31} \quad [3.3]$$

El concepto de la edad del oleaje se basa en comparar la velocidad de propagación del oleaje dominante con la velocidad del viento local. Si el oleaje se propaga a más velocidad que el viento local le corresponde una edad del oleaje mayor.

La expresión para estimar el período fue obtenida por Govindan et.al.(2011) mediante el uso de un algoritmo genético entrenado con datos altimétricos del satélite Topex/Poseidon y datos de boyas ubicadas en el Atlántico Norte y Pacífico Norte pertenecientes a la National Data Buoy Center (NDBC) y al National Institute of Ocean Technology (NIOT). La expresión resultante fue evaluada por los autores con boyas ubicadas en el océano Indico presentando un coeficiente de correlación de 0.79 y un error medio cuadrático de 0.82 seg.

La expresión fue utilizada para estimar el período del oleaje a partir de los datos satelitales disponibles. Los resultados obtenidos se compararon con el período T_{m02} registrado en Hidrovía y se presentan en la Figura 97, Figura 98 y Figura 99, así como en la Tabla 34.

De esta forma se evaluó con datos locales la capacidad de la expresión propuesta por Govindan para estimar el período del oleaje a partir de datos satelitales altimétricos.

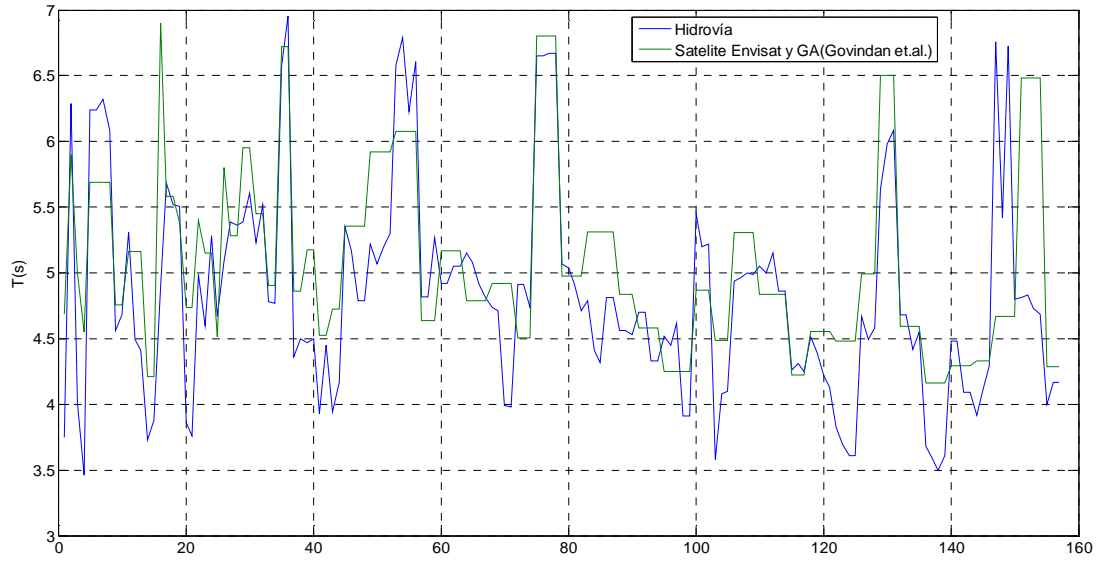


Figura 97.- Satélite Envisat vs. Hidrovía. Período medio (T_z).

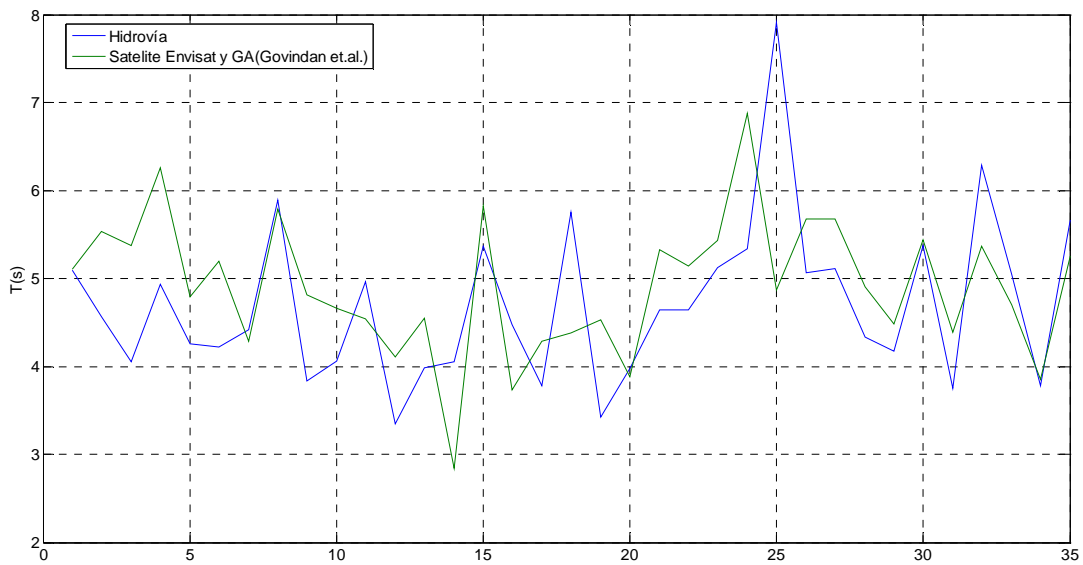


Figura 98.- Satélite Ers2 vs. Hidrovía. Período medio (T_z).

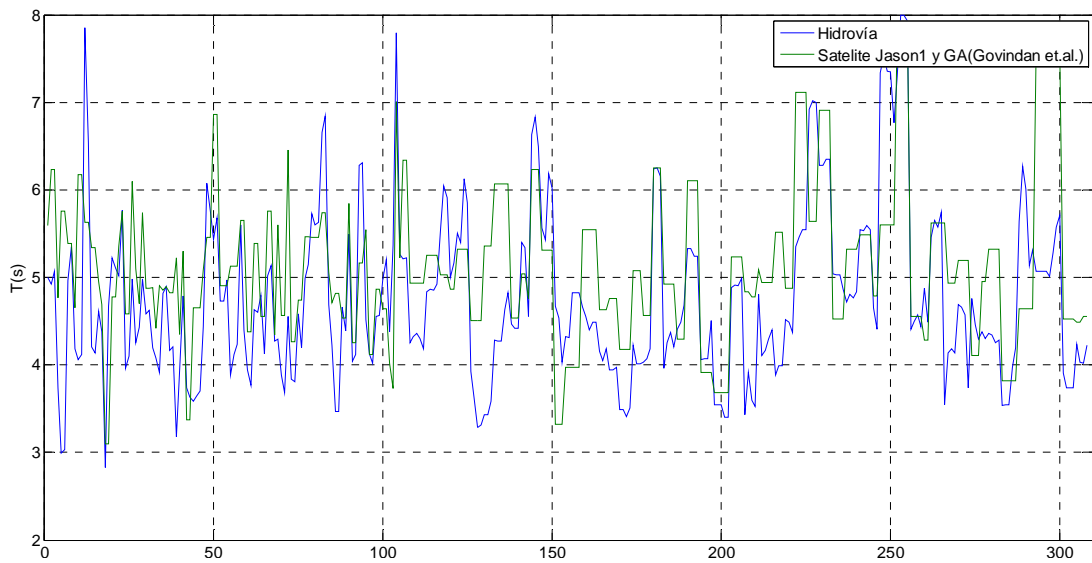


Figura 99.- Satélite Jason1 vs. Hidrovía. Período medio (T_z).

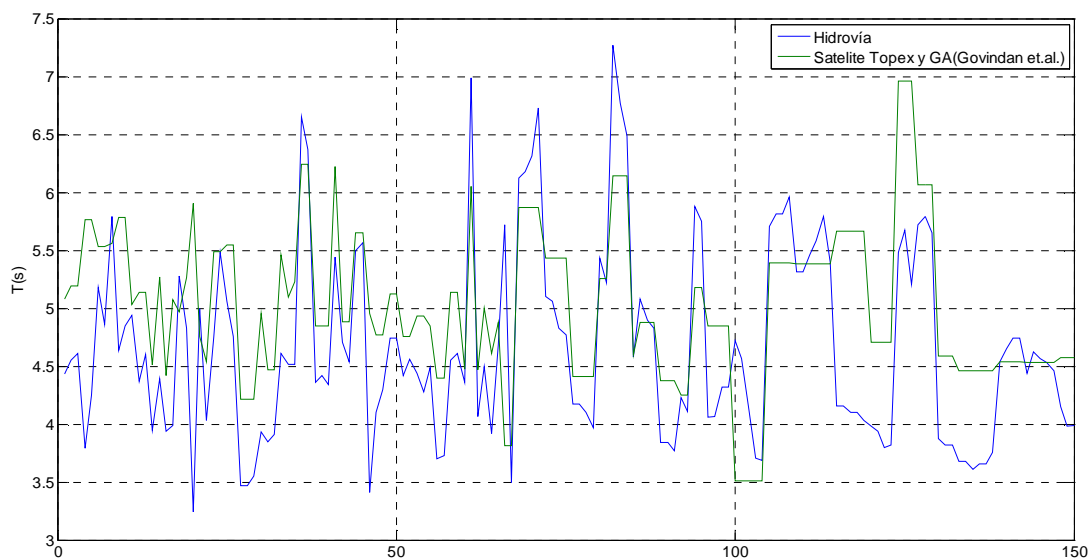


Figura 100.- Satélite Topex vs. Hidrovía. Período medio (Tz).

Tabla 34.- Datos satelitales vs Hidrovía. Diferencias en el período medio (Tz).

	ME (seg)	MAE (seg)	RMSE (seg)	r
Envisat	0.21	0.44	0.6	0.72
Ers2	0.21	0.71	0.91	0.45
Jason1	0.38	0.74	0.94	0.58
Topex	0.37	0.58	0.73	0.65

Los períodos estimados se utilizaron en conjunto con los datos de altura de ola significativa para estimar la potencia del oleaje en base a datos satelitales. Los resultados obtenidos se compararon con la potencia estimada a partir de los datos medidos en Hidrovía y se presentan en la Figura 101, Figura 102, Figura 103 y Tabla 35. En ambos casos la potencia fue estimada con la aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado (2.47).

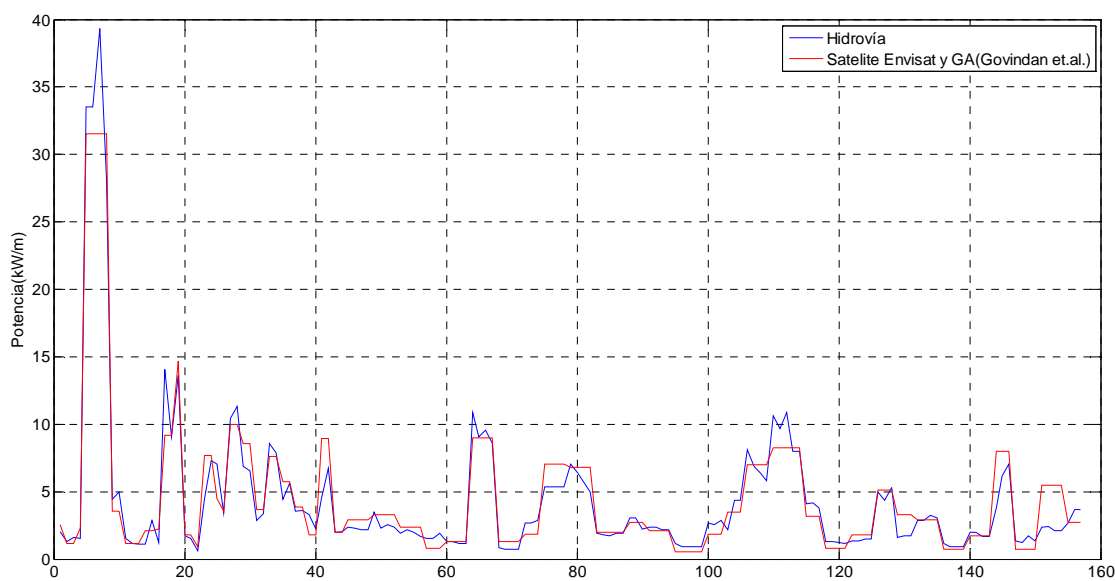


Figura 101.- Satélite Envisat vs. Hidrovía. Potencia estimada.

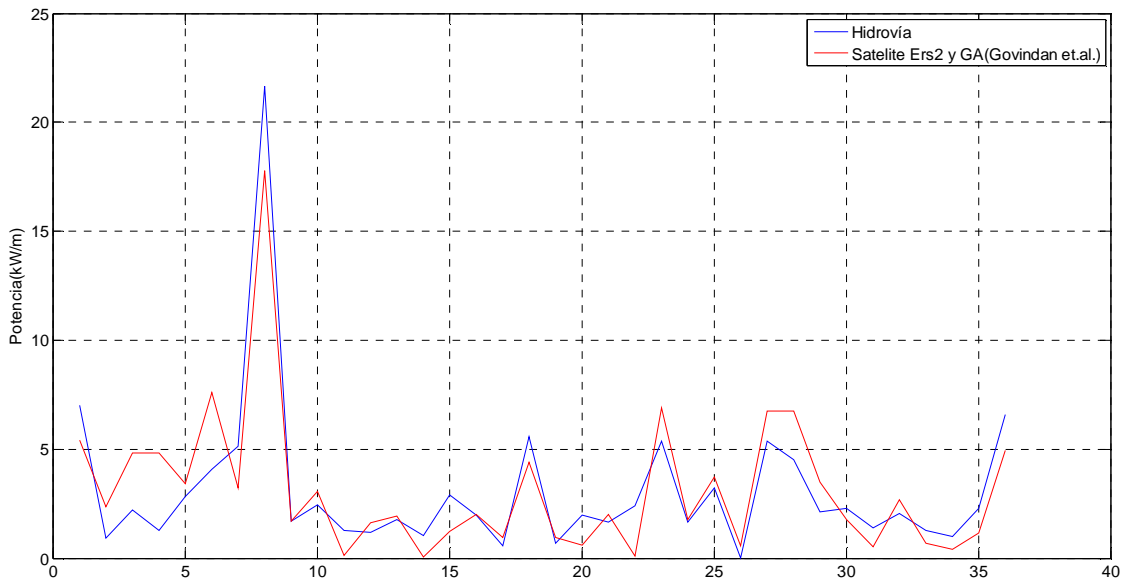


Figura 102.- Satélite Ers2 vs. Hidrovía. Potencia estimada.

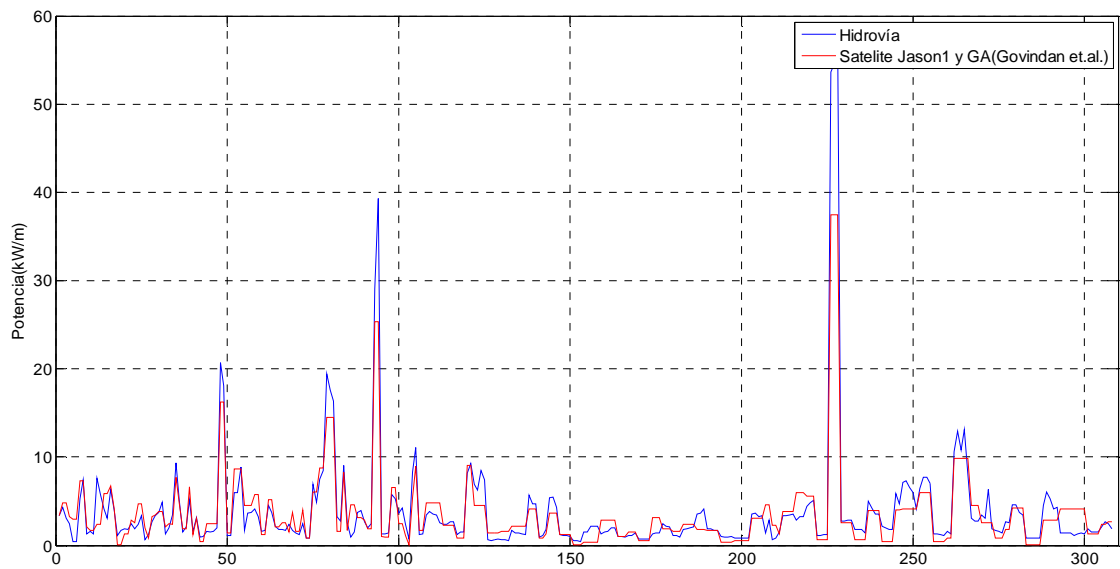


Figura 103.- Satélite Jason1 vs. Hidrovía. Potencia estimada.

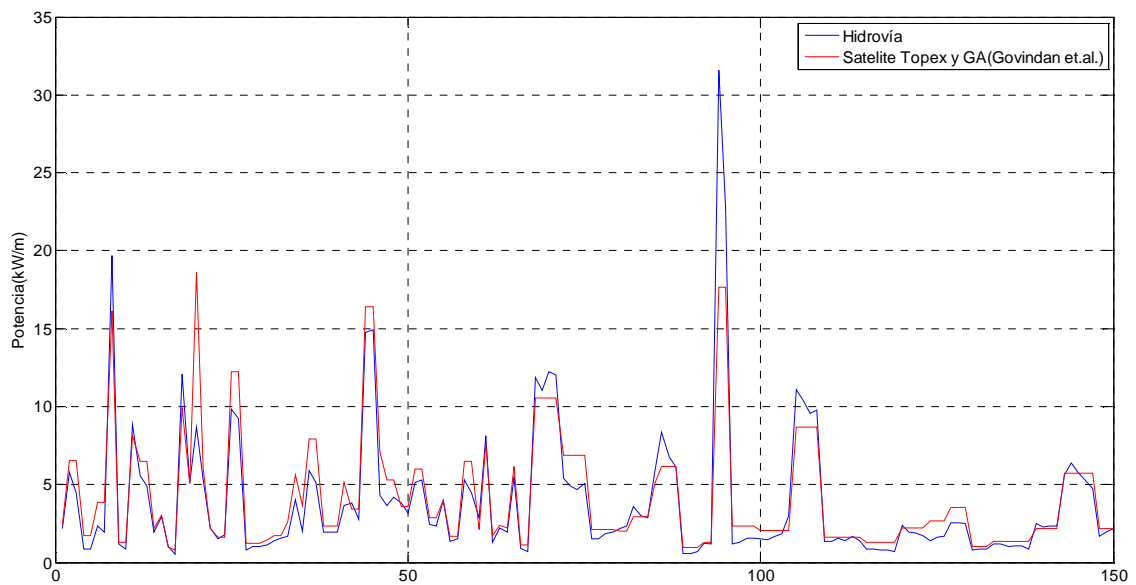


Figura 104.- Satélite Topex vs. Hidrovía. Potencia estimada.

Tabla 35.-Datos satelitales vs Hidrovía. Potencia estimada.

	ME (kW/m)	MAE (kW/m)	RMSE (kW/m)	r
Envisat	0.10	0.89	1.39	0.97
Ers2	0.03	1.21	1.56	0.90
Jason1	-0.29	1.28	2.43	0.96
Topex	0.30	0.91	1.77	0.92

Los buenos resultados obtenidos avalan la utilización de la potencia estimada a partir de datos satelitales para contrastar con los resultados de la modelación.

CAPÍTULO IV

MODELO URU-WAVE

4 Modelo URU-WAVE

4.1 Generalidades

Se utilizó la versión 3.14 del WAVEWATCH III en el modo multi-grilla. Se implementó en el clúster de servidores de cálculo CLUSTER-FING desde donde se ejecuta en la modalidad Open MP.

Consta de tres grillas de cálculo definidas en coordenadas esféricas en el dominio espacial. La grilla más gruesa es una grilla global de $1.25^\circ \times 1^\circ$ mientras que la más fina cubre la región de interés con una resolución de 1 min x 1 min.

Como datos de entrada utiliza los vientos en superficie obtenidos del reanálisis NCEP-CFSR. Para obtener el valor correspondiente a cada punto de grilla e instante de cálculo, utiliza el método de interpolación bilineal.

Los procesos de fricción y rotura por fondo, así como el término lineal de aporte de energía por parte del viento ($S_{viento,1}$, 2.73), son considerados mediante las parametrizaciones implementada en el WAVEWATCH III que se mencionan en el apartado 2.2.3.2.

Para el tratamiento de las interacciones no-lineales por cuádrupletes utiliza la aproximación por interacción discreta (DIA). Con esta opción, los tiempos de cálculo no aumentan excesivamente como sería el caso si se utilizara el método Webb-Resio-Tracy (WRT).

En cuanto a la consideración del proceso de aporte de energía por el viento y de los procesos disipativos que no involucran al fondo, se realizó un análisis comparativo entre los distintos paquetes que ofrece el WAVEWATCH III (Ver apartado 2.2.3.2). Este análisis se presenta en el apartado 4.4. A partir de los resultados del mismo, se implementó el paquete ST3 (WAM-4 y sus variantes).

Posteriormente al análisis comparativo se llevó a cabo la etapa de calibración. La misma se presenta en el apartado 4.5. Esencialmente consistió en buscar una mejora de los resultados del modelo ajustando el coeficiente de disipación por *white-capping* (Cds)¹⁵. Este parámetro es usualmente considerado como variable de ajuste en la modelación del oleaje debido a la relevancia del proceso de disipación por *white-capping* y a lo poco que se comprende del mismo (Cavaleri et. al., 2007).

Tanto en el análisis comparativo entre ST1, ST2 y ST3 como en la etapa de calibración, los resultados del modelo se contrastaron con los datos satelitales y las mediciones in-situ que se presentaron en los apartados 3.2.1 y 3.2.2 respectivamente.

En la Tabla 36 se resumen las distintas parametrizaciones finalmente consideradas para la representación de los procesos físicos involucrados en el término fuente de la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje.

¹⁵ Parámetro adimensional involucrado en el término de disipación por whitecapping del paquete ST3.

Tabla 36.- Parametrizaciones consideradas en el modelo URU-WAVE para representar los distintos procesos involucrados en el término fuente de la ecuación de balance de la densidad de acción del oleaje.

Proceso	Parametrización	Observaciones
Aporte de energía por el viento y procesos disipativos que no involucran el fondo ($S_{viento,2} + S_{wc} + S_{otros,ds}$)	WAM 4 y variantes (ST3)	Se seleccionó a partir del análisis comparativo (Ver apartado 4.4) A partir de la calibración se obtuvo $C_{ds} = -1.5$ (Ver apartado 4.5)
Interacciones no-lineales por cuádrupletes ($S_{nl,4}$)	Aproximación DIA	Se escogió en base al costo computacional.
Término lineal de aporte de energía por parte del viento ($S_{viento,1}$)	Cavaleri y Malanote-Rizzoli (1981)	Única opción implementada en el WWIII. Parámetros por defecto.
Disipación por fondo ($S_{fricción}$)	JONSWAP	Única opción implementada en el WWIII. Parámetros por defecto
Rotura por fondo (S_{rotura})	Batjjes-Jansenn	Única opción implementada en el WWIII. Parámetros por defecto

En lo que respecta a la resolución numérica, tanto la propagación espacial como la propagación intra-espectro se resuelven con el esquema numérico *Ultimate Quickest*. Mientras que para mitigar el efecto *Garden Sprinkler* utiliza la técnica de promediación de Tolman (2002).

Los campos de distintos parámetros del oleaje así como los espectros completos en las veinte boyas virtuales cuya localización se indica en la Figura 105 y la Tabla 37, se obtienen como salidas del modelo. Tanto los campos como los espectros son obtenidos cada 3 horas. Los parámetros del oleaje cuyos campos se obtienen son: altura de ola significativa (H_s), período medio (T_m), dirección media (θ_m), dispersión angular respecto a la dirección media (σ_θ), período pico (T_p), dirección pico (θ_p) y potencia del oleaje. La definición de estos parámetros se presentó en el apartado 2.1.4.

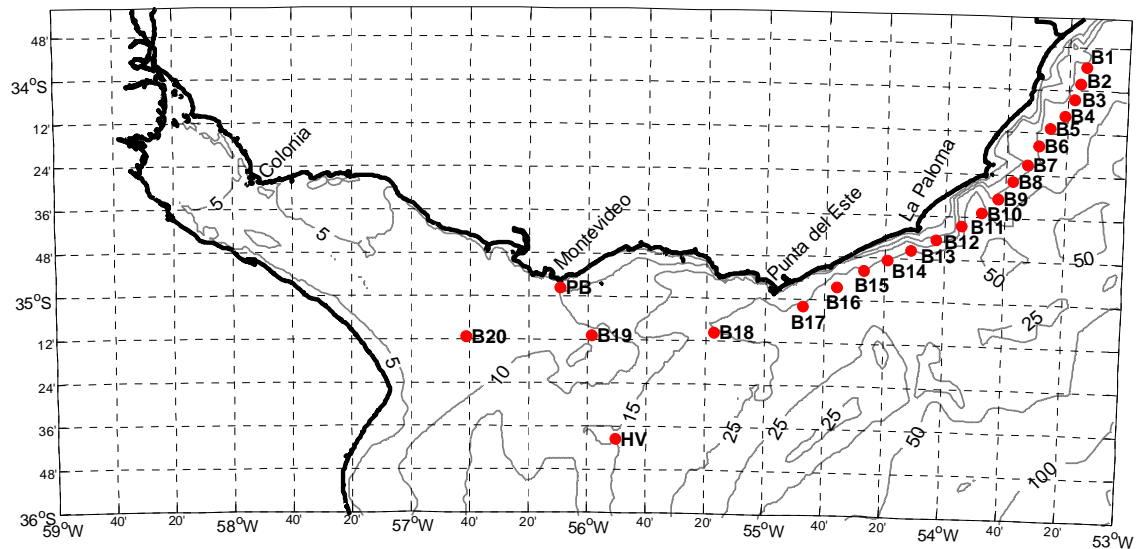


Figura 105.- Ubicación de las boyas virtuales donde se obtienen los espectros como salida del modelo.

Tabla 37.-Boyas virtuales. Ubicación (coordenadas y referencia) y profundidad según la batimetría del modelo.

	Coordenadas	Profundidad	Referencia
B1	(33.89 S, 53.24 W)	16.2	Chuy - Punta del Diablo
B2	(33.97 S, 53.27 W)	18.4	Chuy - Punta del Diablo
B3	(34.04 S, 53.30 W)	17.5	Chuy - Punta del Diablo
B4	(34.12 S, 53.35 W)	17.9	Chuy - Punta del Diablo
B5	(34.18 S, 53.43 W)	20.1	Punta del Diablo- Cabo Polonio
B6	(34.26 S, 53.49 W)	15.1	Punta del Diablo- Cabo Polonio
B7	(34.35 S, 53.55 W)	12.4	Punta del Diablo- Cabo Polonio
B8	(34.43 S, 53.63 W)	14.8	Punta del Diablo- Cabo Polonio
B9	(34.51 S, 53.71 W)	16.5	Cabo Polonio - La Paloma
B10	(34.58 S, 53.80 W)	30.8	Cabo Polonio - La Paloma
B11	(34.64 S, 53.91 W)	21.7	Cabo Polonio - La Paloma
B12	(34.71 S, 54.05 W)	12.0	Cabo Polonio - La Paloma
B13	(34.76 S, 54.19 W)	23.5	La Paloma -Punta del Este
B14	(34.81 S, 54.32 W)	25.3	La Paloma -Punta del Este
B15	(34.86 S, 54.45 W)	26.2	La Paloma -Punta del Este
B16	(34.94 S, 54.60 W)	29.4	La Paloma -Punta del Este
B17	(35.03 S, 54.79 W)	27.0	La Paloma -Punta del Este
B18	(35.16 S, 55.29 W)	22.2	Dentro del estuario
B19	(35.18 S, 55.98 W)	9.1	Dentro del estuario
B20	(35.19 S, 56.69 W)	6.6	Dentro del estuario
HV	(35.66 S, 55.84 W)	15.3	Waverider Hidrovía
PB	(34.96 S, 56.16 W)	9.2	ADCP Punta Brava

4.2 Grillas de cálculo

El modelo consta de tres grillas de cálculo anidadas correspondientes al dominio espacial. La grilla global o de menor resolución (NWW3) fue definida tomando como referencia la grilla del mismo nombre del modelo operacional implementado y ejecutado en la NOAA¹⁶. Al ser una grilla global permite prescindir de datos de oleaje de entrada al modelo como condición de borde ya que todo el oleaje es generado dentro del propio modelo. La grilla local o de mayor resolución (LOC1.5) permite obtener resultados en la zona de interés con una resolución de 1.5 km aproximadamente. Por su parte, la grilla regional o intermedia (REG5-) fue definida para hacer de transición entre la grilla global y la grilla local.

En la Figura 106 se presentan los puntos activos de la grilla global NWW3 y se señala el contorno de la grilla regional REG5-. De la misma forma, en la Figura 107 (izq.) se presentan los puntos activos de la grilla regional REG5- y se señala el contorno de la grilla local LOC1.5. Los puntos activos de esta última se presentan en la Figura 107 (der.). En la Tabla 38 se presentan las características de las grillas de cálculo en cuanto a su discretización espacial.

Como se mencionó en el apartado 2.2.3.3, el WAVEWATCH III considera cuatro pasos de tiempo diferentes. Por lo tanto, cada grilla de cálculo requiere la definición de un paso de tiempo global (Δt_g), un paso de tiempo máximo que cumpla la condición CFL en la propagación espacial (Δt_g), otro que la cumpla en la propagación intra-espectro ($\Delta t_{k-\theta}$) y finalmente un paso

¹⁶ <http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.shtml?>

de tiempo mínimo como referencia para la integración del término fuente (Δt_s). Los pasos de tiempo considerados en cada grilla se presentan en la Tabla 39.

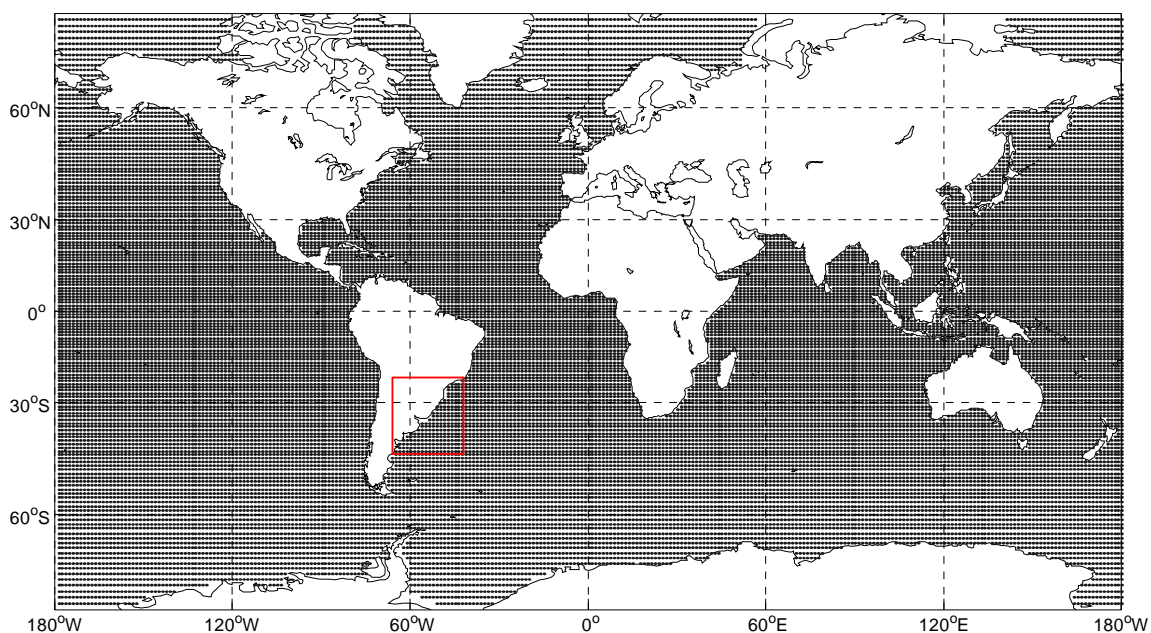


Figura 106.- Grilla global nww3: Contorno y puntos activos. En rojo se indica el contorno de la grilla regional REG5-.

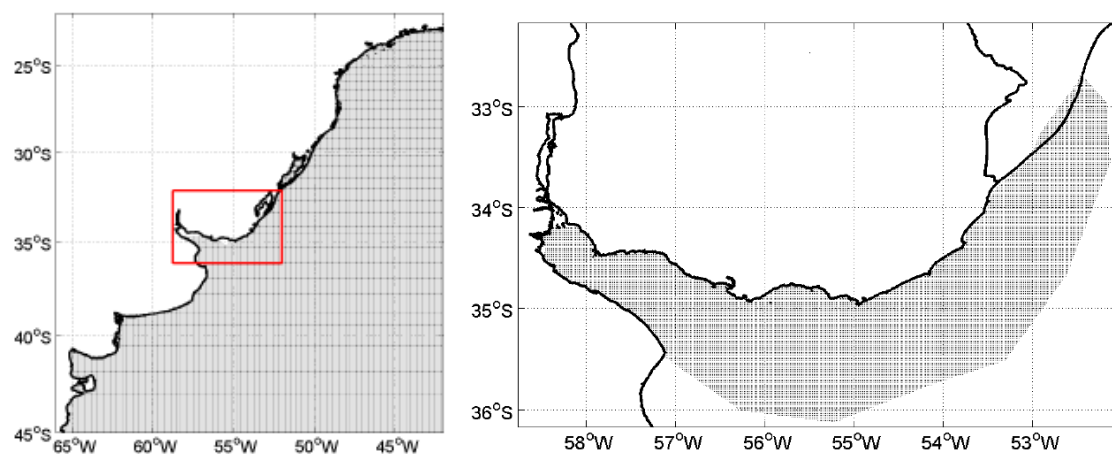


Figura 107.- Izquierda: Grilla regional REG5-: Contorno y puntos activos. En rojo se indica el contorno de la grilla local LOC1.5. Derecha: Grilla local LOC1.5: Contorno y puntos activos.

Tabla 38.-Discretización espacial de las grillas de cálculo. (ΔLon y ΔLat son los incrementos en longitud y latitud respectivamente mientras que N_{Lon} y N_{Lat} son los

Nombre	Rango de Longitudes	Rango de Latitudes	ΔLon	ΔLat	N_{Lon}	N_{Lat}	Total de puntos	Puntos activos
NWW3	0°/358.5°	-78°/78°	1.25°	1°	288	257	45216	29792 (65.9%)
REG5-	-66°/-42°	-42°/-22°	5min	5min	289	277	80053	42055 (52.5%)
LOC1.5	-58.77°/-52.02°	-36.17°/-32.52°	1min	1min	406	220	89320	26249 (29.4%)

Tabla 39.- Pasos de tiempo empleados por cada grilla de cálculo

	Δt_g (seg)	Δt_p (seg)	$\Delta t_{k-\theta}$ (seg)	Δt_s (seg)
NWW3	3600	1300	3600	300
REG5-	720	300	720	20
LOC1.5	180	60	180	20

En lo que respecta a la resolución del dominio espectral, se empleó la misma discretización en las tres grillas de cálculo. Como se mencionó en el apartado 2.2.3.3, la grilla espectral está dividida uniformemente en las direcciones cubriendo el círculo completo, mientras que la división en las frecuencias es logarítmica. Por lo tanto, para definir la grilla espectral es necesario especificar la cantidad de direcciones consideradas (N_{dir}), el número de frecuencias consideradas (N_{frec}), la frecuencia más baja (f_1) y el factor de incremento de las frecuencias (X_f). La discretización del dominio espectral utilizada se presenta en la Tabla 40.

Tabla 40.- Discretización del dominio espectral

N_{dir}	N_{frec}	f_1	X_f
24	25	0.0418 Hz	1.1

De esta forma, las direcciones quedan definidas cada 15° y el rango de frecuencias considerado en el espectro es 0.0418 - 0.4114 Hz lo que equivale al rango de períodos: 2.4 - 23.9 segundos.

4.3 Batimetría y línea de costa

La información batimétrica utilizada para generar las batimetrías de la grilla global y regional fue obtenida de la base de datos ETOPO2v2 (NGDC, 2006). Esta base de datos, de libre acceso, consiste en una grilla de datos batimétricos y altimétricos generada por el Centro Nacional de Información Geofísica (NGDC) de la NOAA, cuya resolución es de 2 x 2 min. En cuanto a la línea de costa, en las tres grillas fue definida a partir de la base de datos GSHHS (Wessel & Smith, 1996). Base de datos de alta resolución, a la cual se accede libremente a través de la página web de la NGDC.

Para pasar de la resolución de la base de datos a la resolución de la grilla, así como para la consideración de las obstrucciones, se utilizó el generador de grillas para WAVEWATCH III programado en MATLAB® por Chawla & Tolman (2007). En la Figura 108 y Figura 109 se presentan las batimetrías implementadas en el modelo, correspondientes a la grilla global y regional respectivamente.

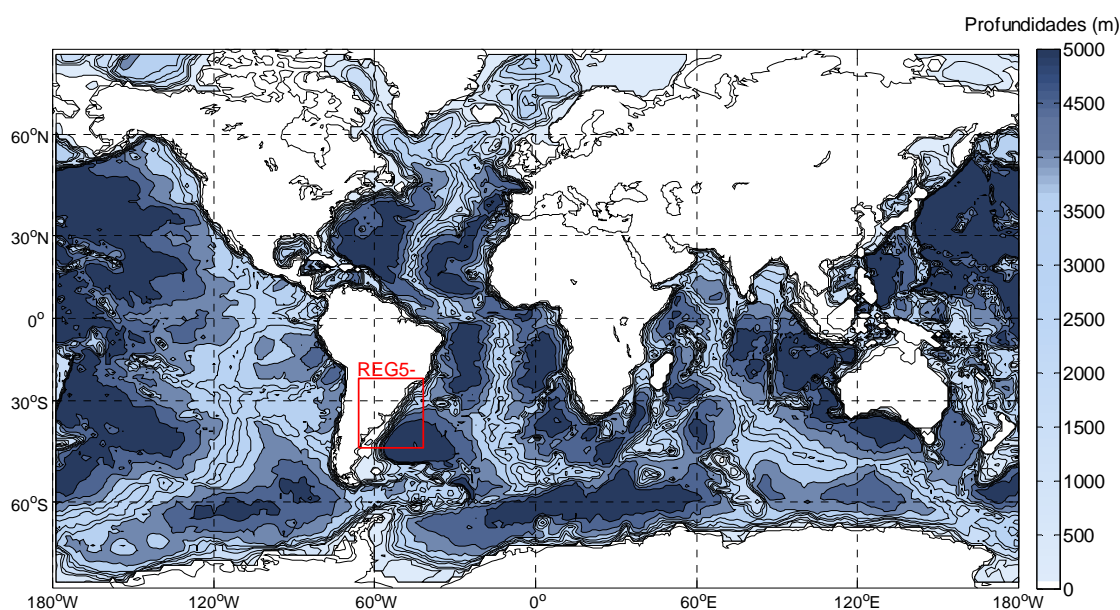


Figura 108.- Batimetría de la grilla global NWW3

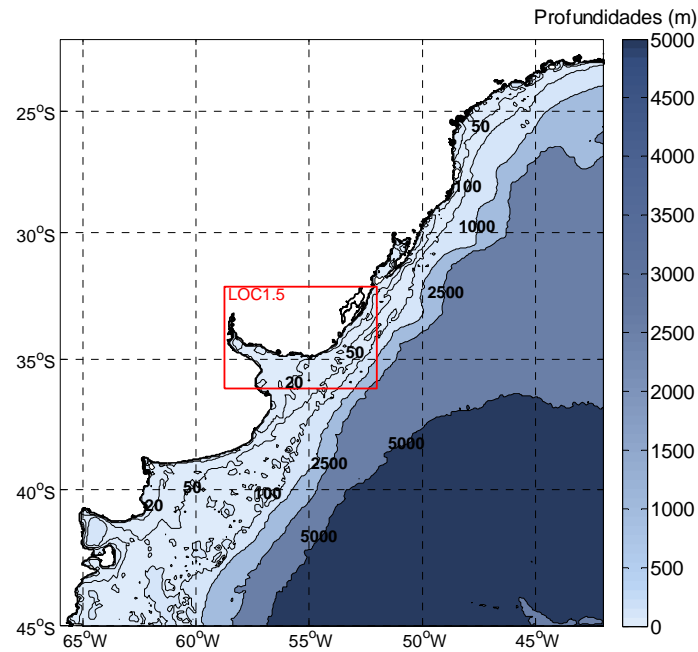


Figura 109.- Batimetría de la grilla regional REG5-

La resolución y calidad de información de la base de datos ETOPO2v2 es apropiada para la construcción de las batimetrías de la grilla global y regional, sin embargo la batimetría de la grilla local requiere de la utilización de información local y de mayor resolución. En este sentido, la batimetría de la grilla local se construyó a partir de los datos del proyecto FREPLATA (2002) y datos provistos por el Servicio Hidrográfico Naval de la Argentina. La batimetría obtenida para la grilla local se presenta en la Figura 110. En el Anexo 6 se presenta una comparación entre esta batimetría y la carta náutica del SOHMA a escala 1:400.000¹⁷, observándose una buena concordancia entre ambas batimetrías.

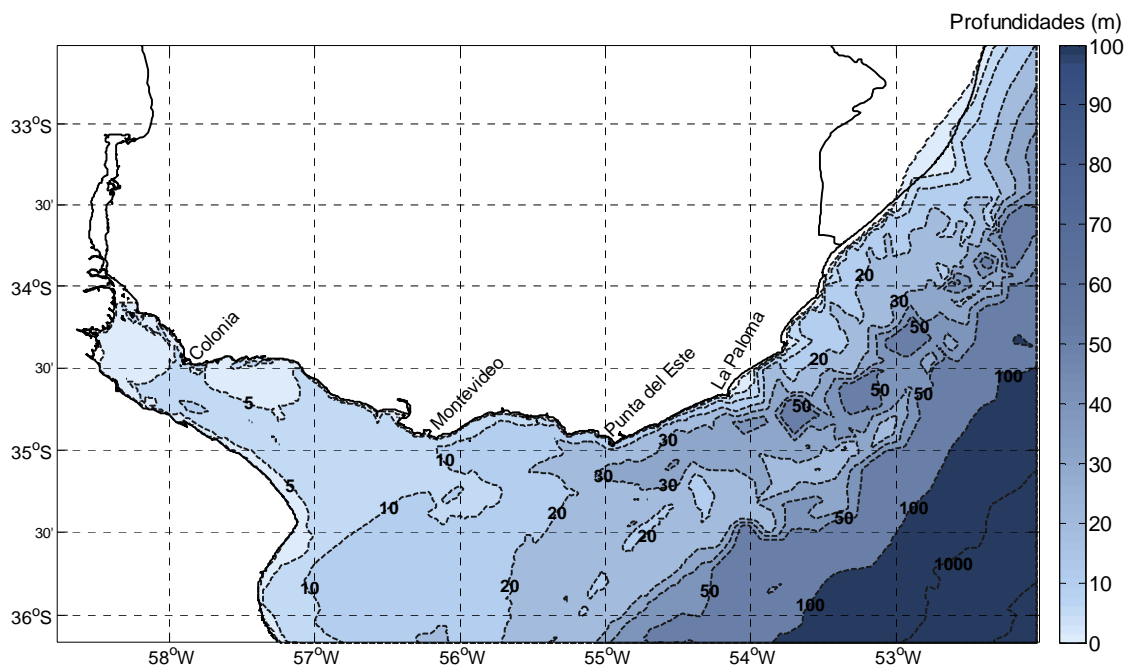


Figura 110.- Batimetría de la grilla local LOC1.5-

¹⁷ Atlántico sur y Río de la Plata. Desde Faro del Chuy hasta Puerto Sauce y Cabo San Antonio.

4.4 Análisis comparativo

4.4.1 Introducción

El análisis comparativo consistió en la realización de tres simulaciones de un mismo período de tiempo, donde las diferencias entre las simulaciones fue el paquete de parametrizaciones escogido para la representación del proceso de aporte de energía por el viento y los procesos disipativos que no involucran al fondo. En lo que sigue, a cada una de estas simulaciones se la identificará como ST1, ST2 y ST3 haciendo referencia al paquete de parametrizaciones utilizado (Ver apartado 2.2.3.2).

4.4.2 Metodología

Los resultados de las simulaciones se contrastaron con los datos de las mediciones in-situ (Waverider-Hidrovia y ADCP-Punta Brava) y los datos satelitales. Para ello fue necesario buscar un período de tiempo que cuente con información de estas tres fuentes de datos de oleaje. En este sentido, el período escogido fue el primer semestre del año 2005.

En la comparación con las mediciones in-situ, se consideraron las series de altura de ola significativa (H_s), período medio T_{m01} , período pico (T_p), dirección pico (D_p) y la potencia estimada con la aproximación para aguas profundas y oleaje totalmente desarrollado (2.47). En lo que respecta a los datos satelitales, se comparó la altura de ola significativa y la potencia estimada en las cinco regiones que se presentan en la Figura 111.

La comparación con los datos satelitales requirió implementar un algoritmo en MATLAB® que a cada dato satelital, comprendido en el período de comparación, lo apareje con la salida del modelo más próxima espacial y temporalmente. Como las salidas del modelo están definidas en la grilla local y se obtienen cada 3 horas, la distancia entre la posición del dato satelital y el punto de grilla del modelo es menor a 1km y la diferencia temporal menor a 1.5 horas.

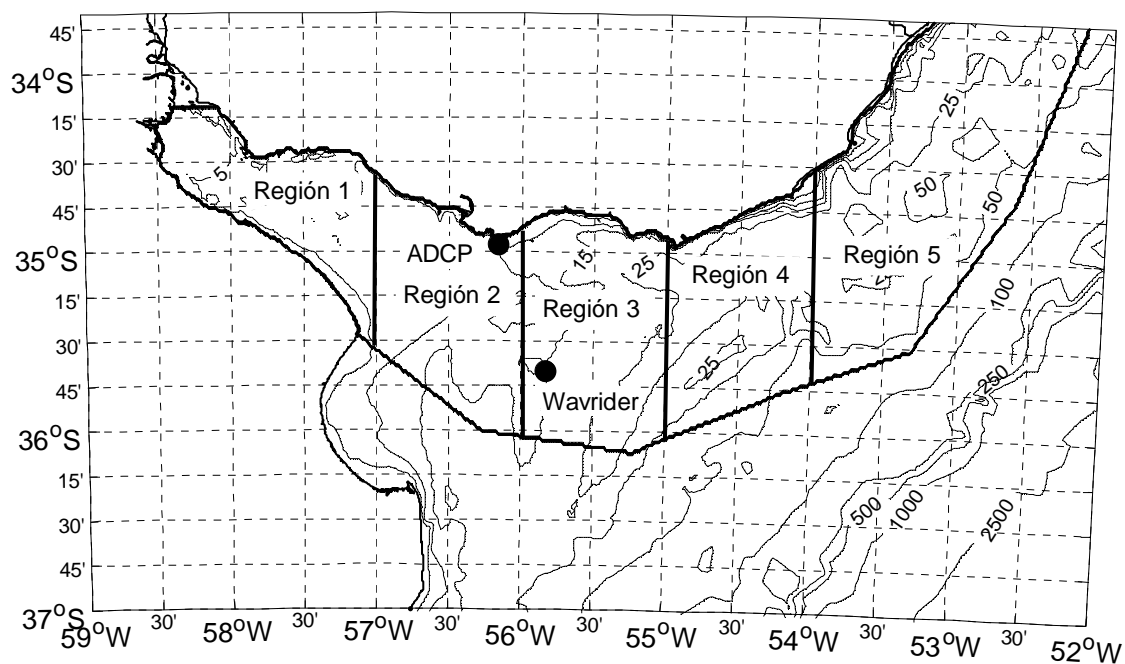


Figura 111.- Regiones establecidas para comparar los resultados del modelo

Las diferencias entre los resultados del modelo con las medidas in-situ o satelitales, se presentan en el apartado 4.4.3 mediante la comparación de las series temporales, diagramas de dispersión y la cuantificación de los siguientes descriptores estadísticos:

- Error medio (EM): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i)$
- Error absoluto medio (MAE): $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - O_i|$
- Error cuadrático medio (RMSE): $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - O_i)^2}$
- Coeficiente de correlación (r): $\frac{\sum(Y-\bar{Y})-(O-\bar{O})}{\sqrt{\sum(Y-\bar{Y})^2} \sqrt{\sum(O-\bar{O})^2}}$

Donde Y_i y O_i son las dos series de datos que se comparan y N es la cantidad de datos de las mismas.

4.4.3 Resultados

4.4.3.1 Comparación con los datos de la boya Waverider

En la Figura 112 se presenta la comparación de las series temporales de altura de ola significativa obtenidas de las simulaciones y a partir de los datos medidos por la boya Waverider. Se presenta un período de 15 días a los efectos de posibilitar una mejor visualización de los resultados. Las series completas se presentan en el Anexo 7. En la Figura 113, y también para H_s , se presentan los diagramas de dispersión que contrastan los resultados de cada simulación con los datos medidos. Mientras que en la Tabla 41, y también para H_s , se presentan los valores obtenidos de los descriptores estadísticos empleados para cuantificar las diferencias.

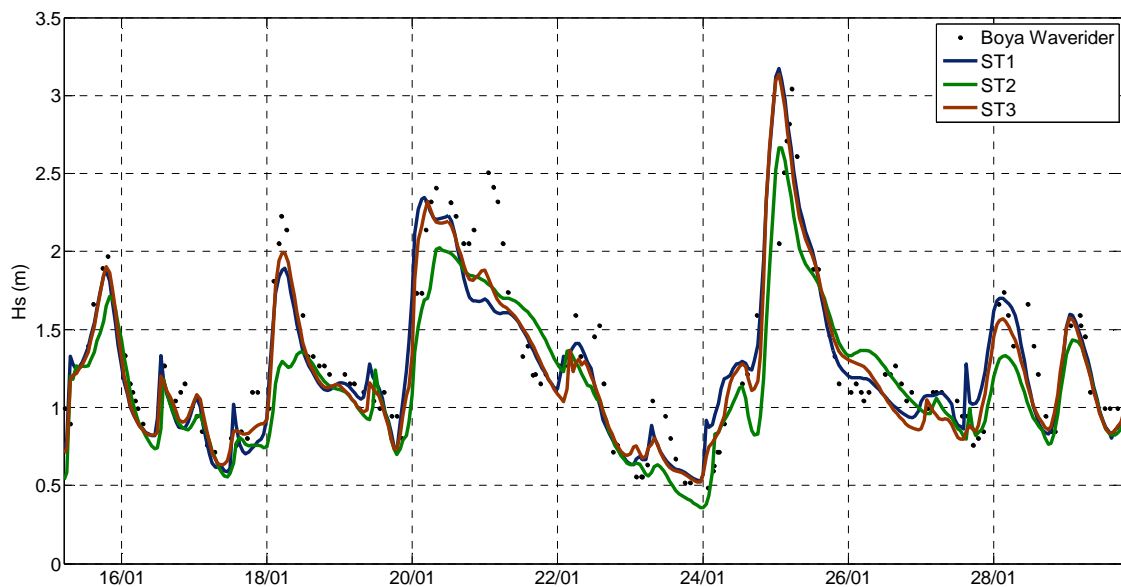


Figura 112.- Comparación de series. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Altura de ola significativa. 15/1/2005-31/1/2005.

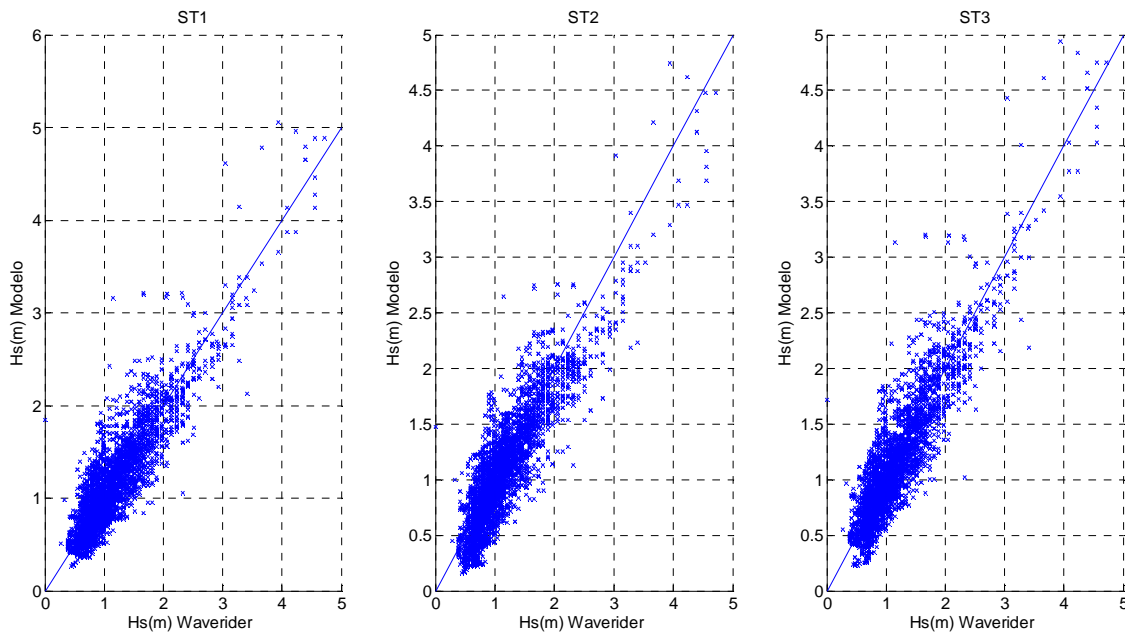


Figura 113.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Altura de ola significativa.

Tabla 41.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Hs.

	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	r (m)
ST1	0	0,19	0,25	0,88
ST2	-0,06	0,20	0,26	0,88
ST3	-0,02	0,18	0,24	0,90

Los gráficos de las figuras 112 y 113 muestran, en general, una buena concordancia entre los resultados de Hs de las tres simulaciones (ST1, ST2 y ST3) y los valores obtenidos a partir de las medidas de la boya, mientras que los valores de la Tabla 41, muestran que los resultados de ST1 y ST3 son levemente mejores que los resultados obtenidos con ST2.

Análogamente a la comparación presentada para Hs, en la Figura 114, Figura 115 y en la Tabla 42 se presentan la comparación de series temporales, diagramas de dispersión y valores de los descriptores estadísticos correspondientes a T_{m01} .

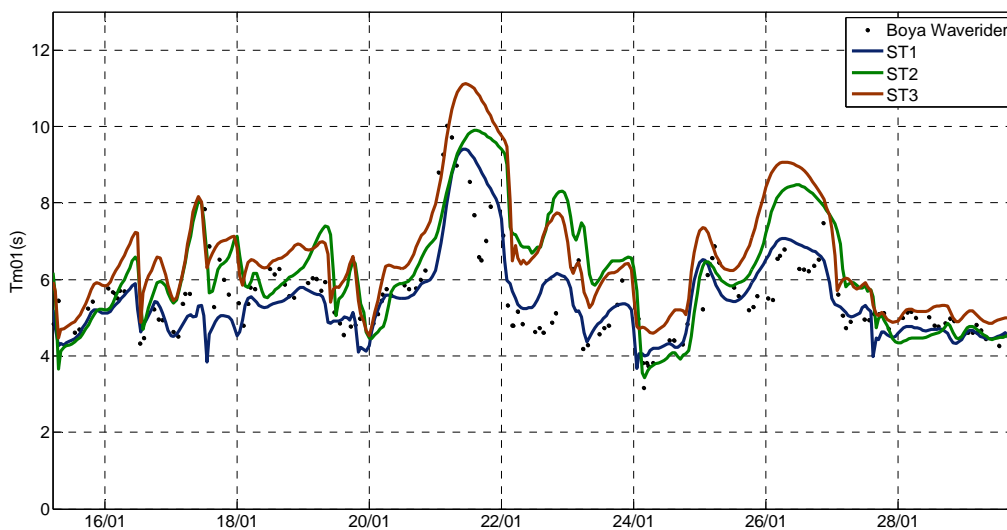


Figura 114.- Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período T_{m01} . 15/1/2005-31/1/2005.

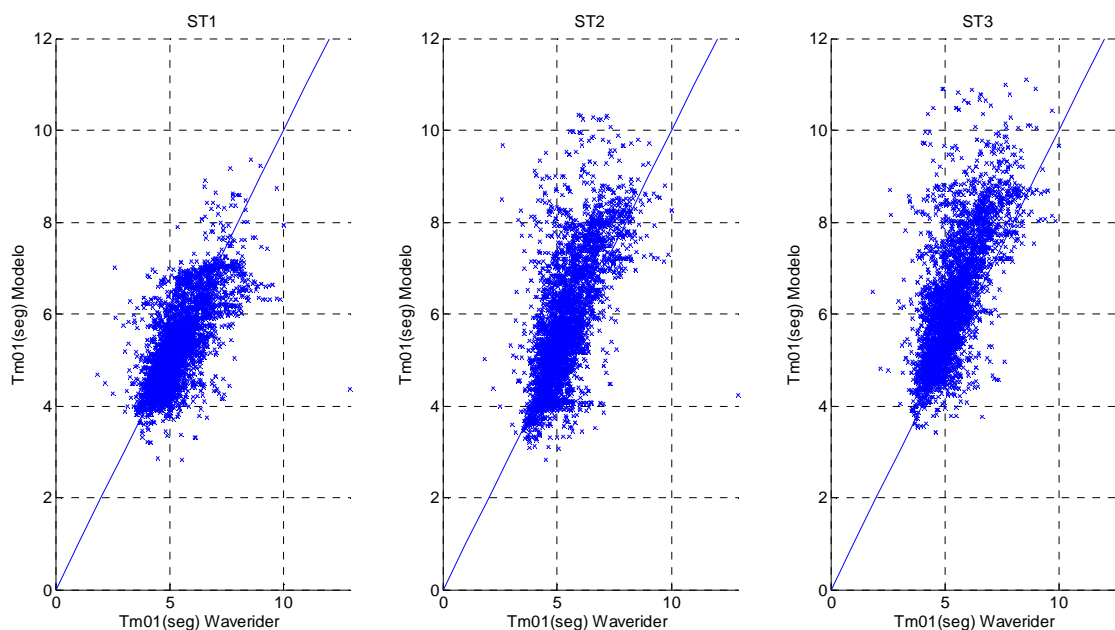


Figura 115.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período T_{m01} .

Tabla 42.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período T_{m01} .

	ME (seg.)	MAE (seg.)	RMSE (seg.)	r (seg.)
ST1	-0,08	0,54	0,77	0,70
ST2	0,39	0,78	1,11	0,66
ST3	0,89	1,00	1,35	0,67

En general, para T_{m01} , también se aprecia una buena concordancia entre los resultados de las simulaciones y las medidas de la boya, aunque la dispersión y los errores son mayores que los obtenidos para Hs, siendo la simulación ST1 la que presentó los mejores resultados.

En la Figura 116, Figura 117 y en la Tabla 43 se presentan la comparación de series temporales, diagramas de dispersión y valores de los descriptores estadísticos correspondientes a la potencia estimada.

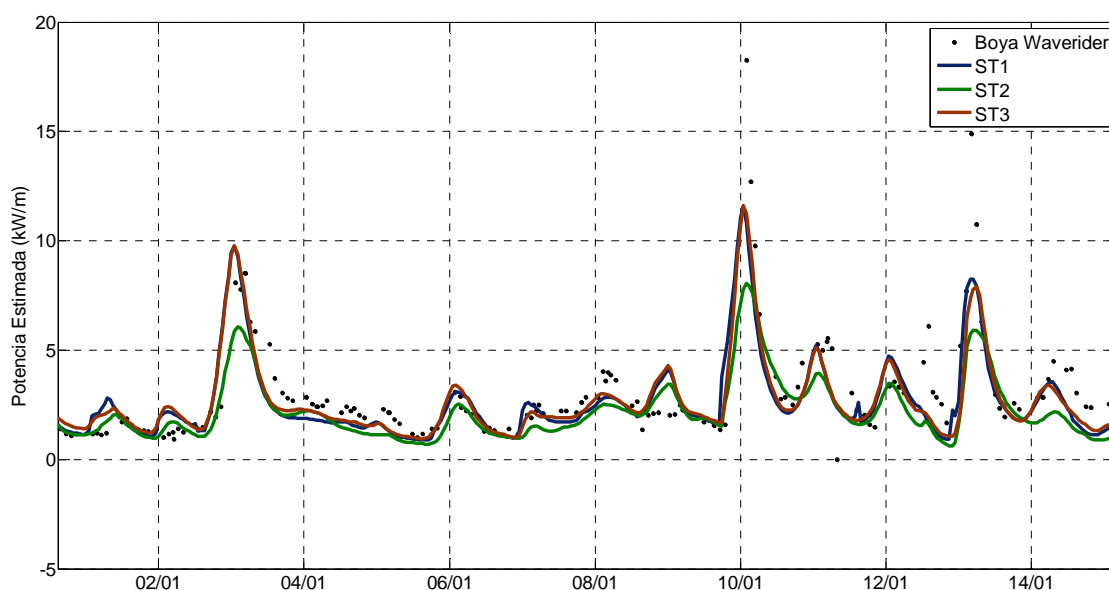


Figura 116.- Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Potencia estimada. 15/1/2005-31/1/2005.

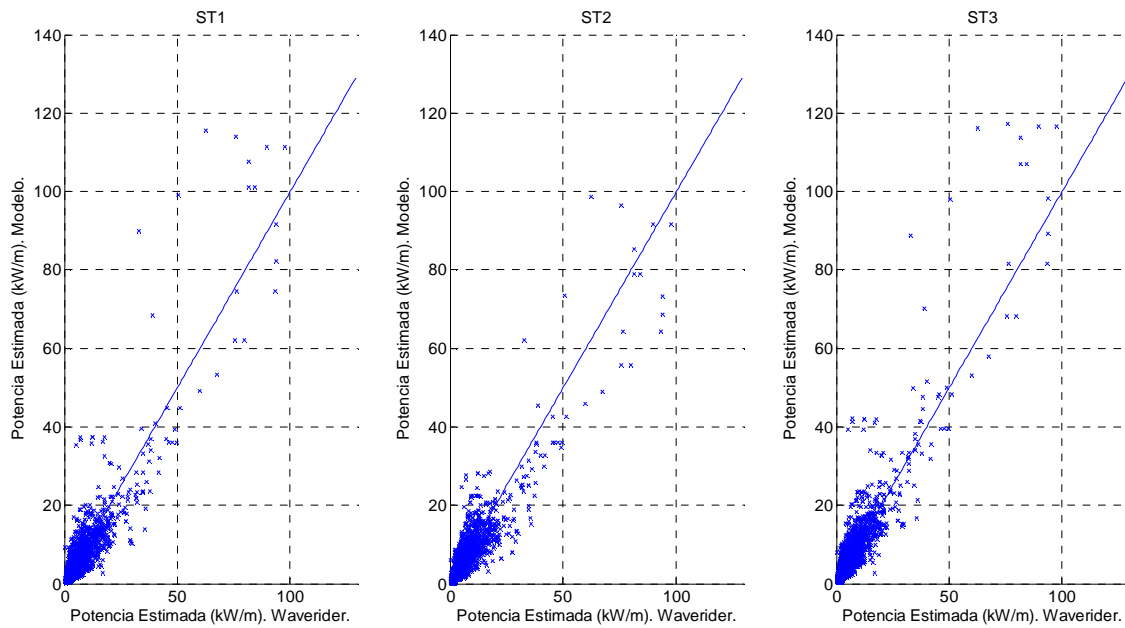


Figura 117.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Potencia Estimada.

Tabla 43.- Descriptores estadísticos. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Potencia estimada.

	ME (kW/m)	MAE (kW/m)	RMSE (kW/m)	r
ST1	-0,09	1,55	3,20	0,90
ST2	-0,24	1,57	2,88	0,91
ST3	0,54	1,58	3,30	0,91

Como era de esperar, ya que la potencia estimada se obtiene de H_s y T_{m01} , se obtuvo una buena concordancia entre la potencia estimada a partir de los resultados del modelo y estimada a partir de las medidas de la boya.

En la Figura 118, Figura 119 y en la Tabla 44 se presentan la comparación de series temporales, diagramas de dispersión y valores de los descriptores estadísticos correspondientes al período pico.

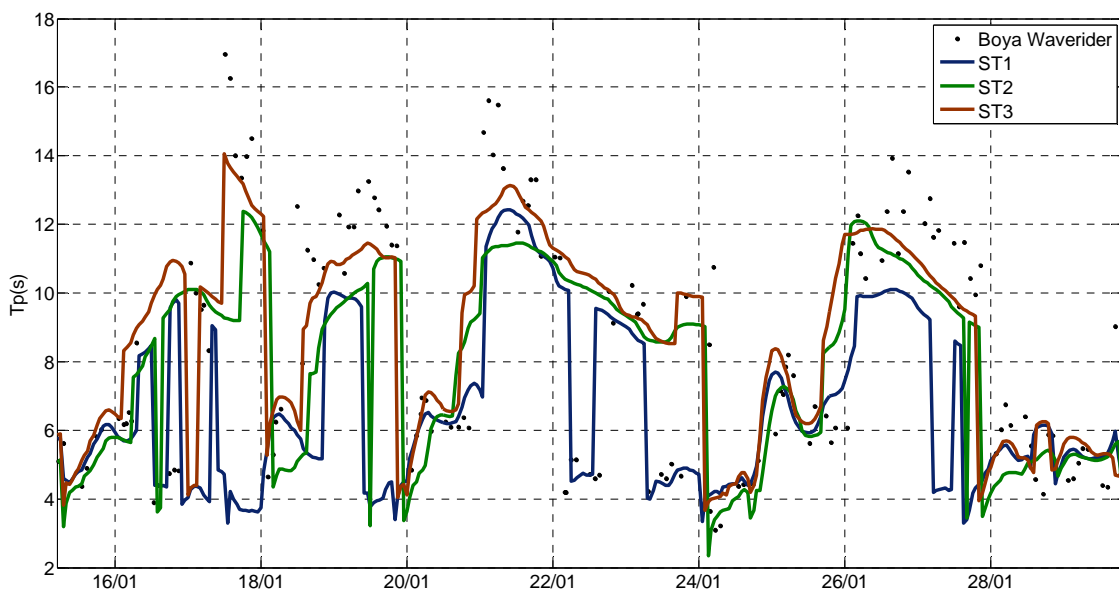


Figura 118.- Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período pico. 15/1/2005-31/1/2005.

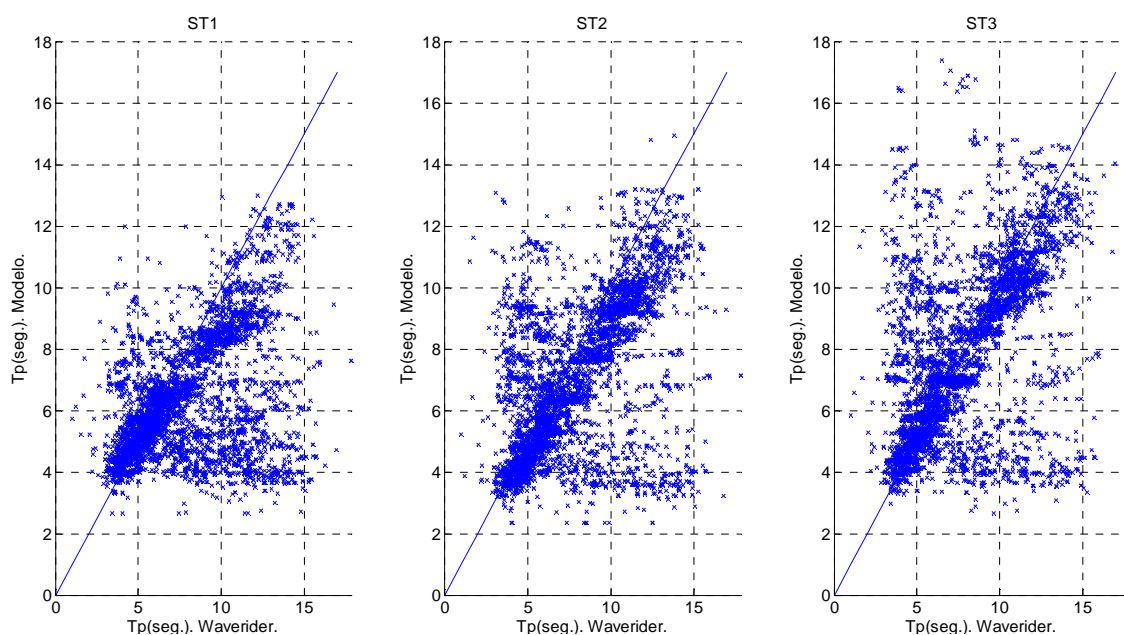


Figura 119.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período pico.

Tabla 44.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Período pico.

	ME (seg.)	MAE (seg.)	RMSE (seg.)	r
ST1	-1,55	2,13	3,25	0,43
ST2	-0,93	1,94	2,90	0,53
ST3	-0,11	1,81	2,89	0,52

En términos generales, también se aprecia una buena concordancia para el período pico aunque con una mayor dispersión que la obtenida para el período T_{m01} , siendo la simulación ST3 la que presentó los mejores resultados. Esta mayor dispersión se entiende en base a la frecuente ocurrencia de oleajes mixtos, donde conviven mar de fondo y oleaje local con energías similares pero con períodos pico diferentes y por lo tanto la determinación de un período pico global no es del todo clara.

Finalmente, en la Figura 120, Figura 121 y en la Tabla 45 se presentan la comparación de series temporales, diagramas de dispersión y valores de los descriptores estadísticos correspondientes a la dirección pico. Cada punto de los diagramas de dispersión de la Figura 121 se localiza según el resultado del modelo y su color responde a la dirección pico obtenida a partir de la boya

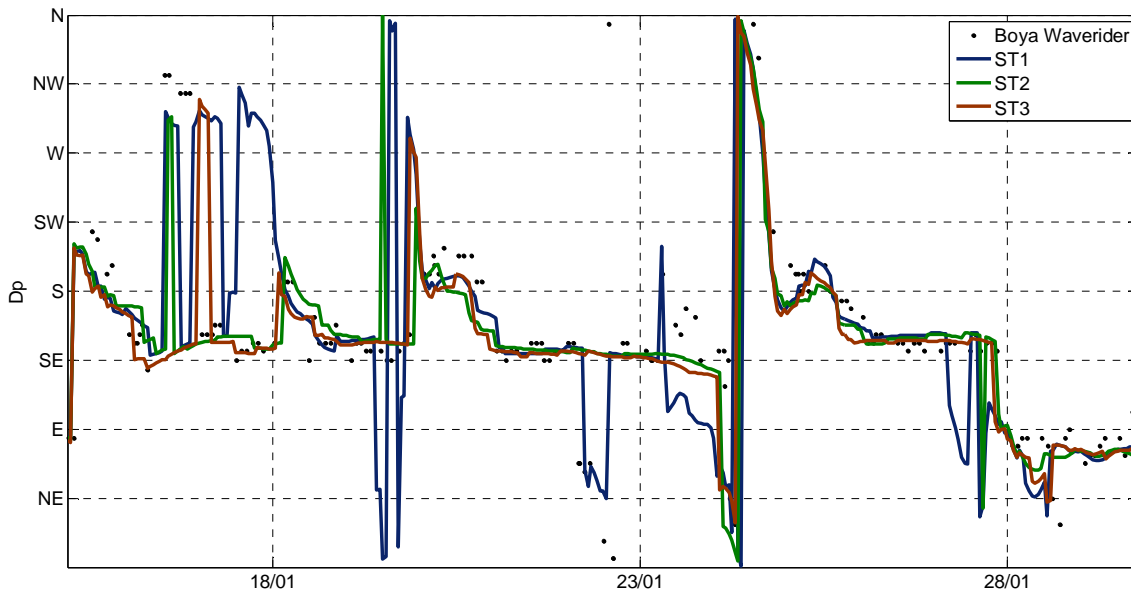


Figura 120.- Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Dirección pico. 15/1/2005-31/1/2005.

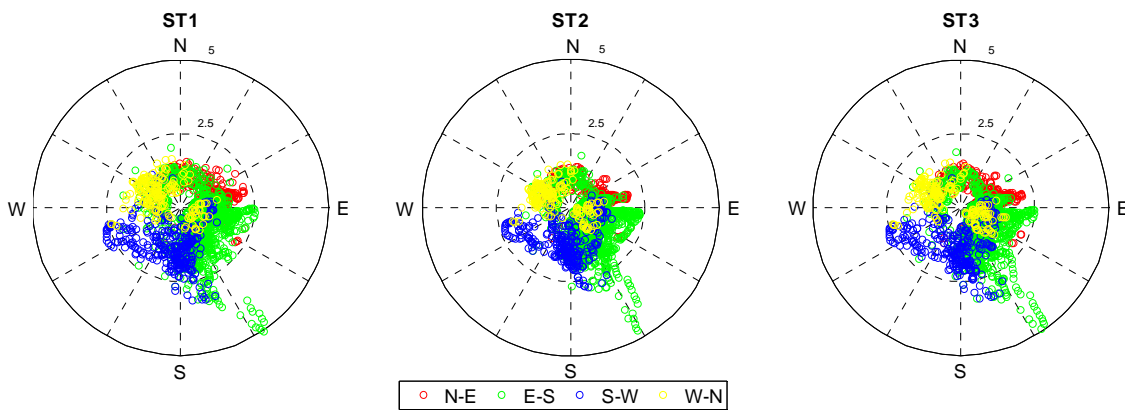


Figura 121.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Dirección pico.

Tabla 45.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Waverider vs. Modelo. Dirección pico.

	ME (°)	MAE (°)	RMSE (°)
ST1	1,39	37,85	71,26
ST2	-1,26	36,78	70,16
ST3	-5,53	34,80	67,59

En cuanto a la dirección pico, también se aprecia una buena concordancia general para las tres simulaciones. Al igual que para el período pico, la frecuencia de ocurrencia de oleajes mixtos así como diferencias entre la discretización del espectro que utiliza modelo y la discretización empleada para procesar los datos de la boya constituyen algunas de las principales causas de las diferencias.

4.4.3.2 Comparación con los datos del ADCP

Los resultados de la comparación con los datos del ADCP se presentan de forma análoga a la comparación con los datos de la boya. En las figuras 122, 124, 126, 128 y 130 se presentan la comparación de las series temporales correspondientes a los parámetros H_s , T_{m01} , potencia estimada, T_p y D_p respectivamente. Para estos mismos parámetros y en el mismo orden, en las figuras 123, 125, 127, 129 y 131 se presentan los diagramas de dispersión, mientras que en las tablas 46, 47, 48, 49 y 50, se presentan los valores obtenidos de los descriptores estadísticos.

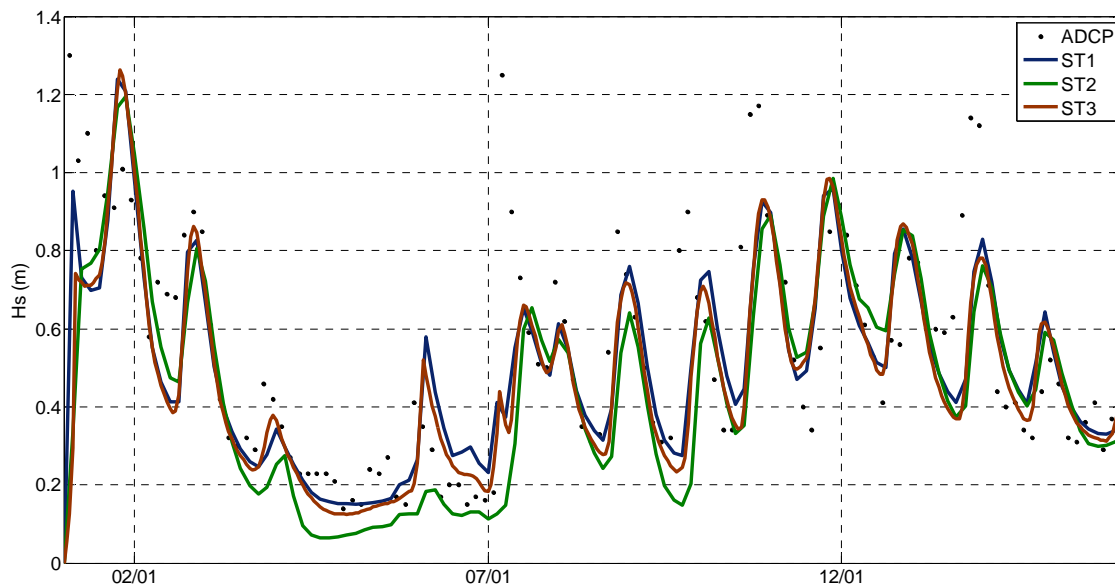


Figura 122.- Comparación de series. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Altura de ola significativa. 15/1/2005-31/1/2005.

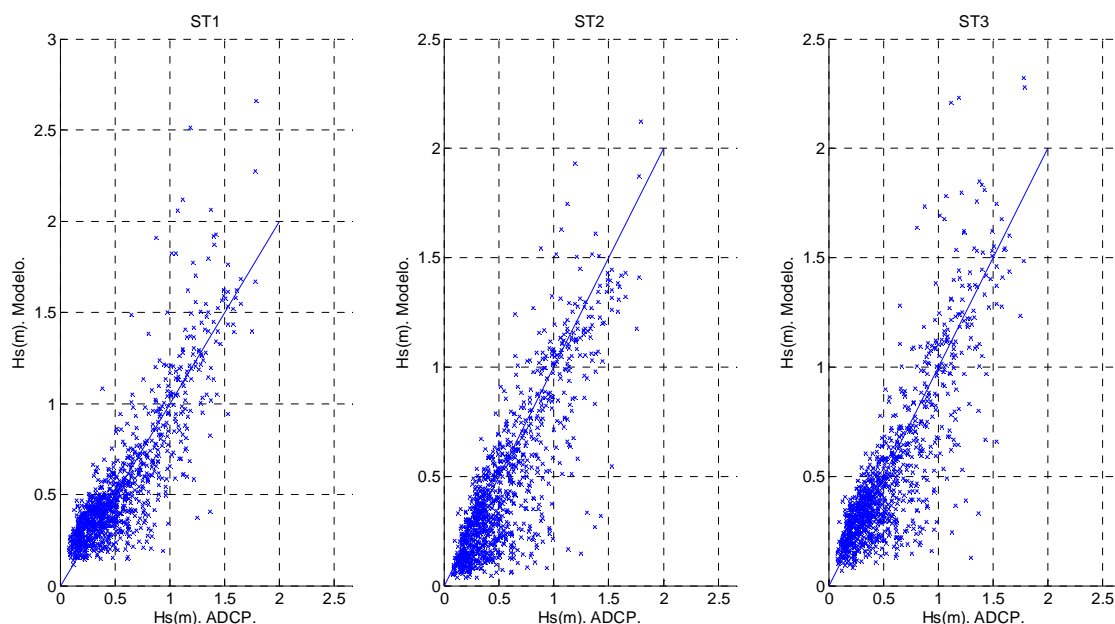


Figura 123.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Altura de ola significativa

Tabla 46.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Altura de ola significativa.

	ME (m)	MAE (m)	RMSE (m)	r (m)
ST1	0,00	0,14	0,20	0,84
ST2	-0,09	0,16	0,22	0,84
ST3	-0,04	0,14	0,21	0,83

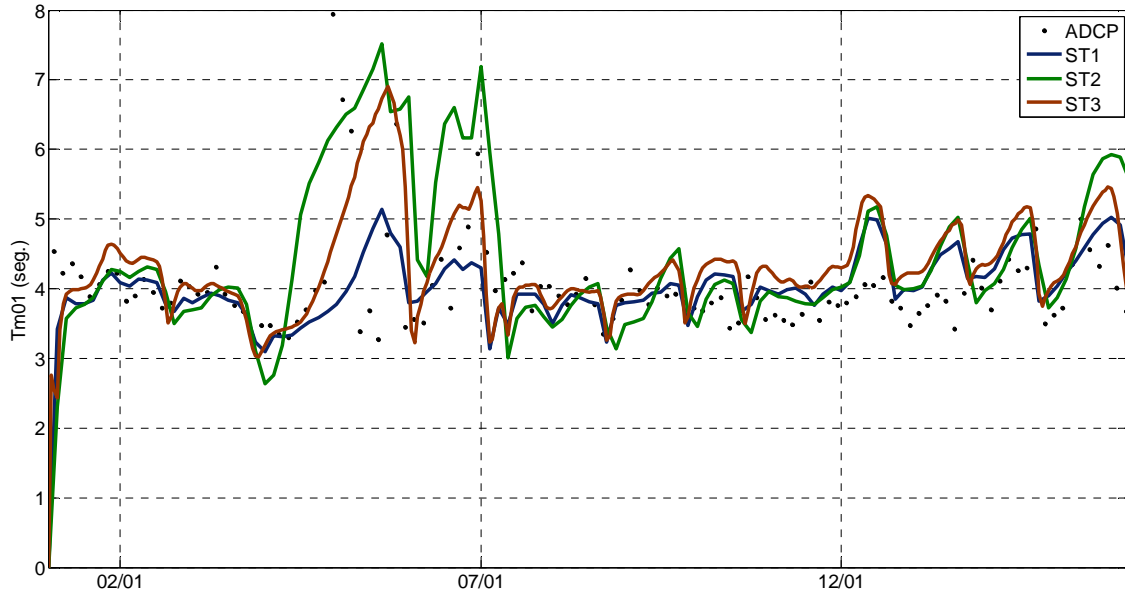


Figura 124.- Comparación de series. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período Tm01. 15/1/2005-31/1/2005.

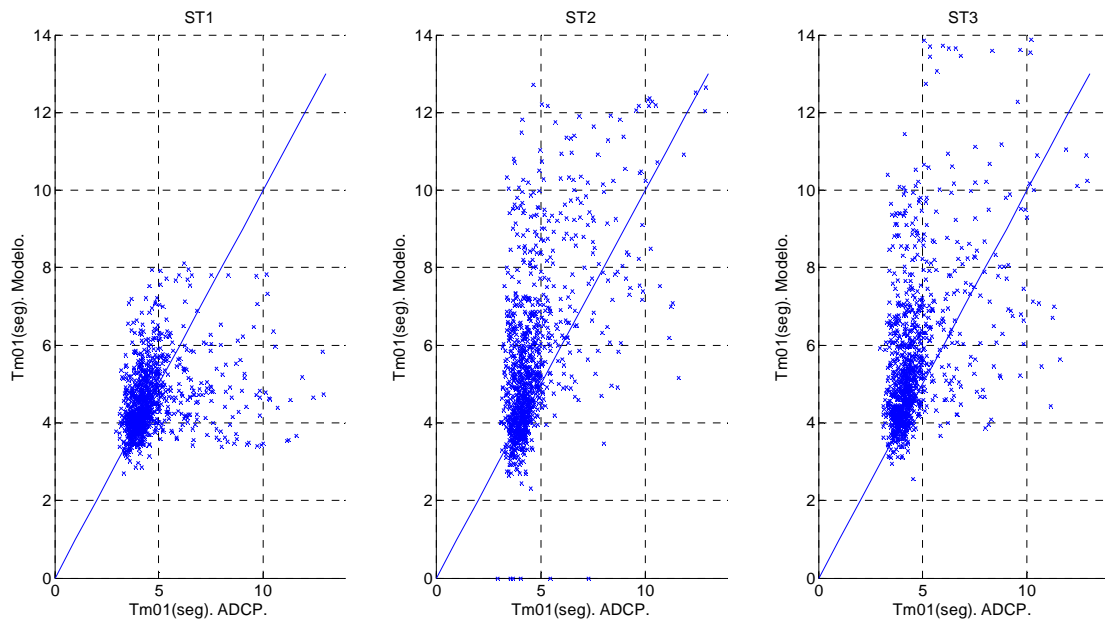


Figura 125.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período Tm01.

Tabla 47.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período T_{m01}.

	ME (seg.)	MAE (seg.)	RMSE (seg.)	r (seg.)
ST1	-0,09	0,90	1,48	0,27
ST2	0,95	1,39	2,01	0,55
ST3	0,98	1,37	2,00	0,48

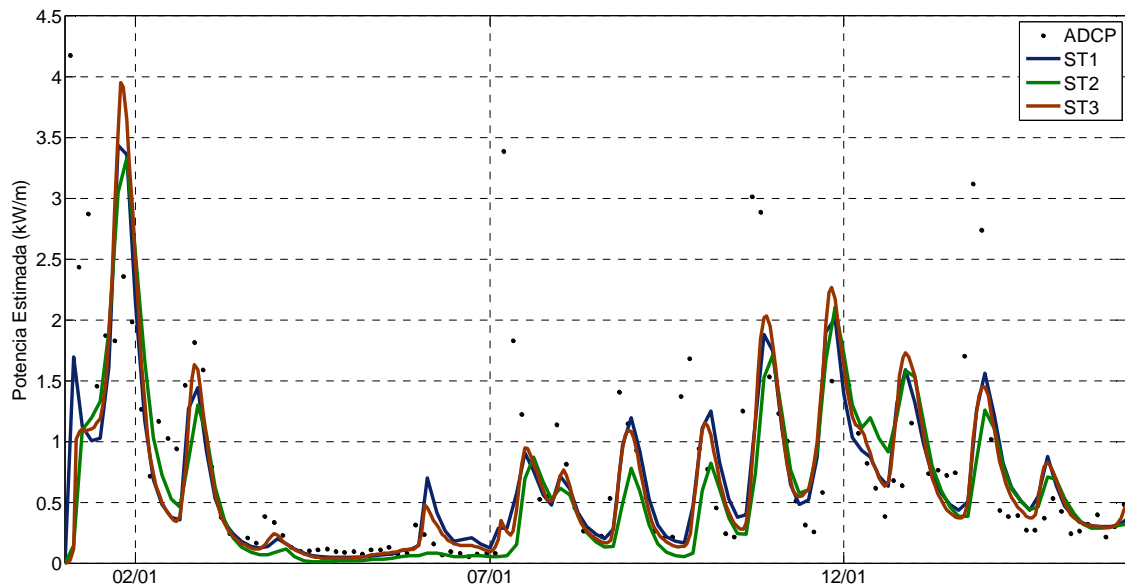


Figura 126.- Comparación de series. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Potencia estimada. 15/1/2005-31/1/2005.

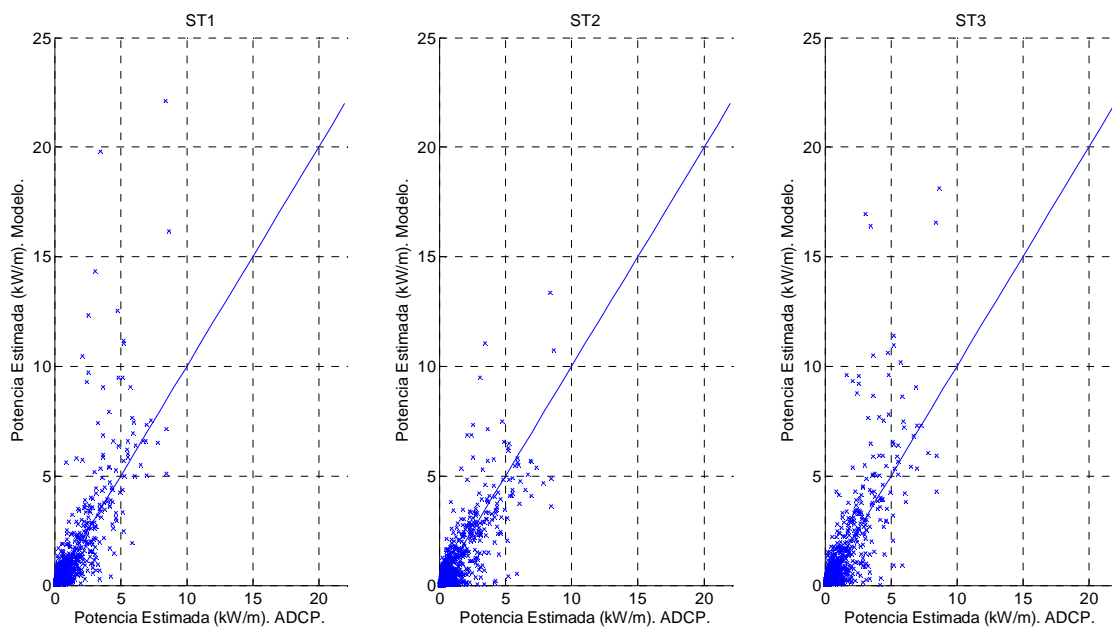


Figura 127.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Potencia estimada.

Tabla 48.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Potencia estimada.

	ME (kW/m)	MAE (kW/m)	RMSE (kW/m)	r
ST1	0,10	0,51	1,24	0,78
ST2	-0,12	0,47	0,88	0,80
ST3	0,11	0,55	1,24	0,77

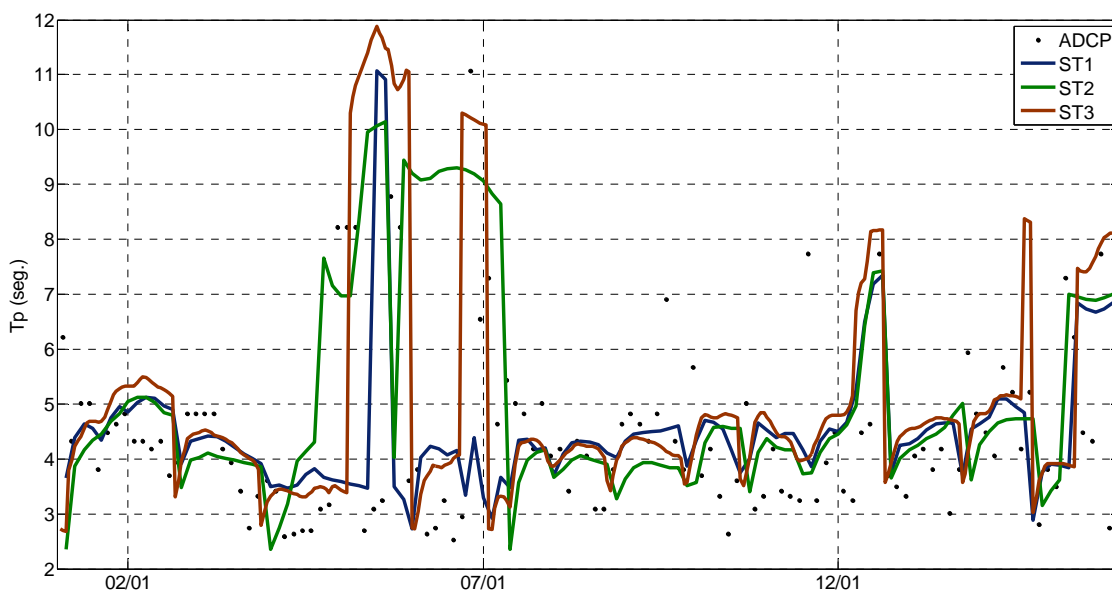


Figura 128.- Comparación de series. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período pico. 15/1/2005-31/1/2005.

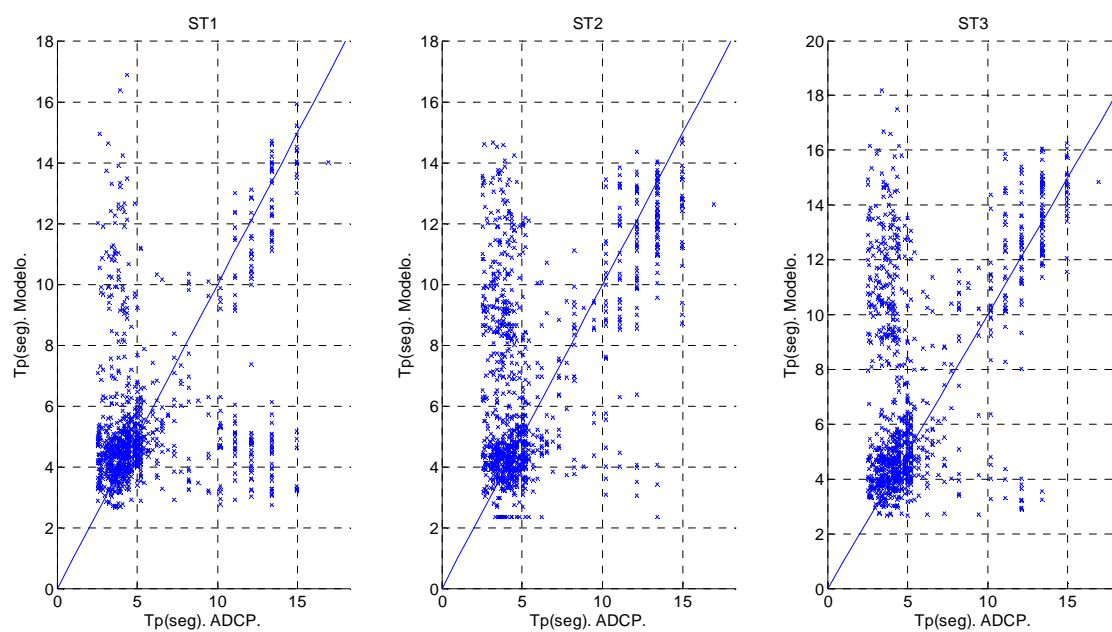


Figura 129.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período pico.

Tabla 49.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Período pico.

	ME (seg.)	MAE (seg.)	RMSE (seg.)	r
ST1	-0,05	2,13	3,47	0,37
ST2	1,27	2,44	3,58	0,50
ST3	1,90	2,73	4,20	0,48

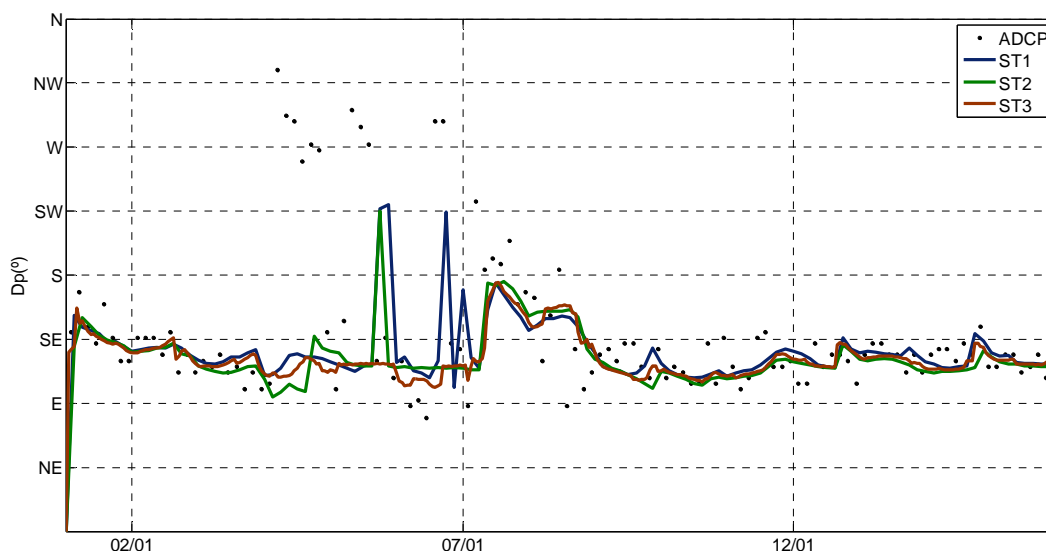


Figura 130.- Comparación de series. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Dirección pico. 15/1/2005-31/1/2005.

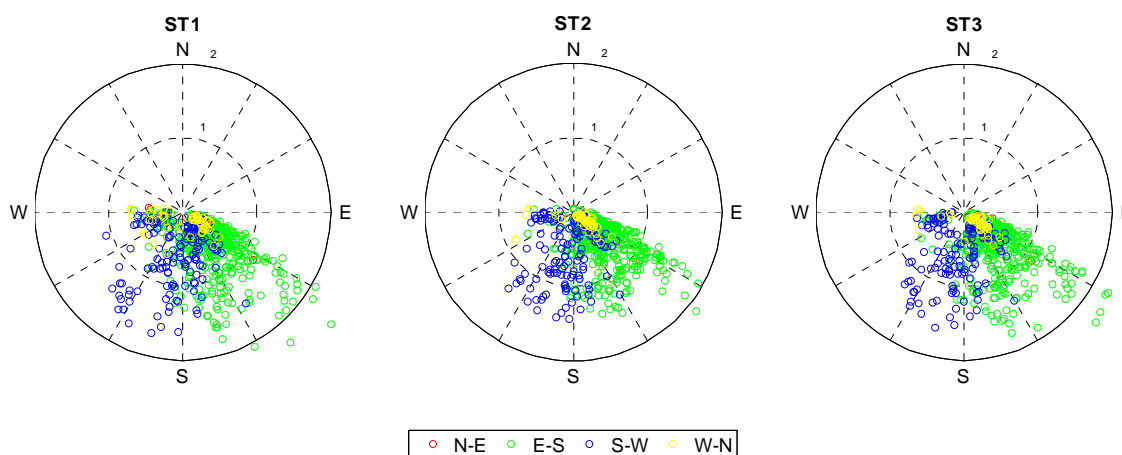


Figura 131.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Dirección pico.

Tabla 50.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. ADCP vs. Modelo. Dirección pico.

	ME (°)	MAE (°)	RMSE (°)
ST1	-7,27	31,23	52,01
ST2	-14,46	31,20	51,96
ST3	-12,91	31,39	51,98

En términos generales se aprecia una buena concordancia para todos los parámetros y para las tres simulaciones. Al igual que los resultados obtenidos en la comparación con la boya Waverider, las simulaciones ST1 y ST3 son las que mejor representan la altura de ola significativa, mientras que ST1 es la que mejor representa el período T_{m01} y, a diferencia de la comparación con la boya, también es la que mejor representa el período pico. Respecto a los períodos T_{m01} y T_p , se observa que ST2 y ST3 sobreestiman en muchos casos los datos del ADCP, dando indicios que el modelo sobreestima la energía del mar de fondo y subestima la energía del oleaje local en la zona donde está ubicado el ADCP. El mismo se encuentra próximo a Montevideo, por lo que el mar de fondo que llega, se propagó a lo largo de 100 km de estuario donde hay poca profundidad y barro en el lecho. Es posible que la sobreestimación de la energía del mar de fondo se deba a un déficit en la representación del proceso de disipación por fondo, ya que la misma nunca considera la presencia de barro. Por otra parte, el ADCP se

encuentra muy próximo a la costa, por lo que el viento local en el modelo está dado por puntos de grilla con puntos vecinos continentales. Como se analizó en el apartado 3.1, estos puntos tienden a subestimar la magnitud del viento y la consecuencia en el modelo de oleaje es una subestimación del oleaje local. Esta interpretación de que el modelo sobrestima la energía del mar de fondo y subestima la energía del oleaje local también queda de manifiesto en la Figura 131. En la misma, se aprecia que oleajes detectados por el ADCP con dirección pico contenida en el cuadrante W-N (puntos amarillos), se corresponden mayoritariamente con direcciones pico obtenidas del modelo contenidas en el cuadrante E-S y en particular concentradas en la dirección SE. Esto se observa para las tres simulaciones. El oleaje en el ADCP proveniente del cuadrante W-N es un oleaje local de baja energía debido a que las distancias de *fetch* son cortas, mientras que la dirección del mar de fondo en el ADCP es típicamente SE (ver apartado 3.2.1.1). Lo que significa que en los casos en los que predomina el oleaje local, con el modelo se obtuvo una predominancia del mar de fondo, lo que constituye un indicio más de que el modelo en la zona del ADCP tiende a sobrestimar el mar de fondo y a subestimar el oleaje local. A partir de los resultados de la comparación con los datos satelitales que se presenta a continuación, se concluyó que la subestimación del oleaje local es el motivo principal de los errores del modelo dentro del estuario.

4.4.3.3 Comparación con los datos satelitales

En las figuras 132, 133, 134, 135 y 136 se presentan los diagramas de dispersión de altura de ola significativa y potencia estimada correspondientes a las regiones 1, 2, 3, 4 y 5 (Ver Figura 111) respectivamente. Posteriormente en la Tabla 51 y Figura 137 se presentan los valores correspondientes a H_s de los descriptores estadísticos empleados para cuantificar las diferencias. De la misma forma, en la Tabla 52 y Figura 138 se presentan los descriptores estadísticos correspondientes la potencia estimada. La comparación de las series completas se presenta en el Anexo 7.

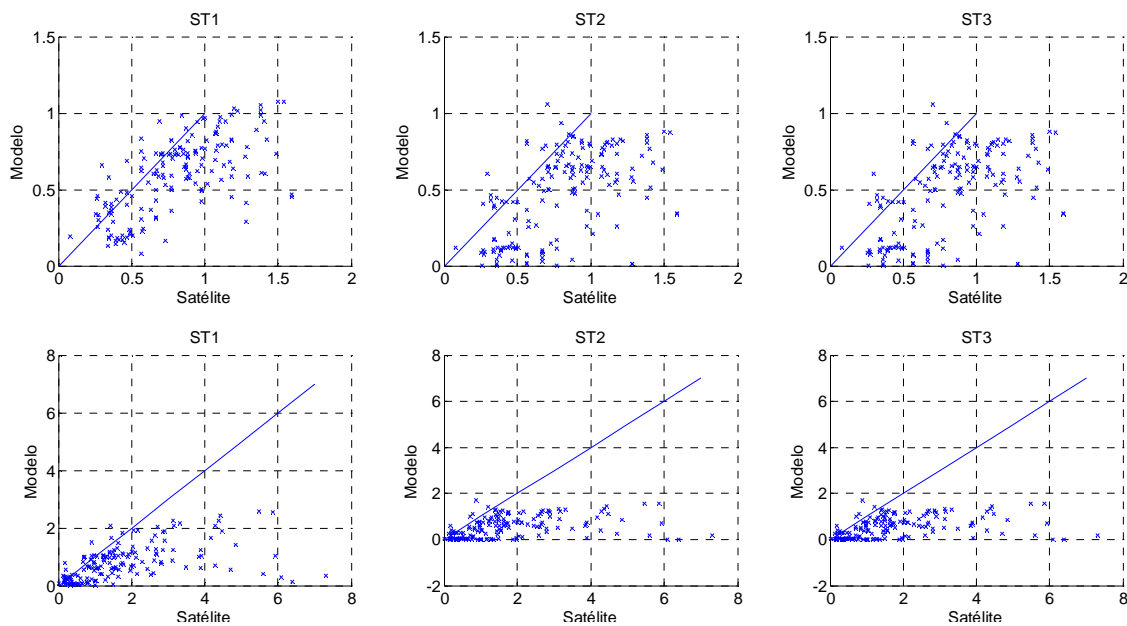


Figura 132.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Región 1. Altura de ola significativa (arriba) y Potencia estimada (abajo).

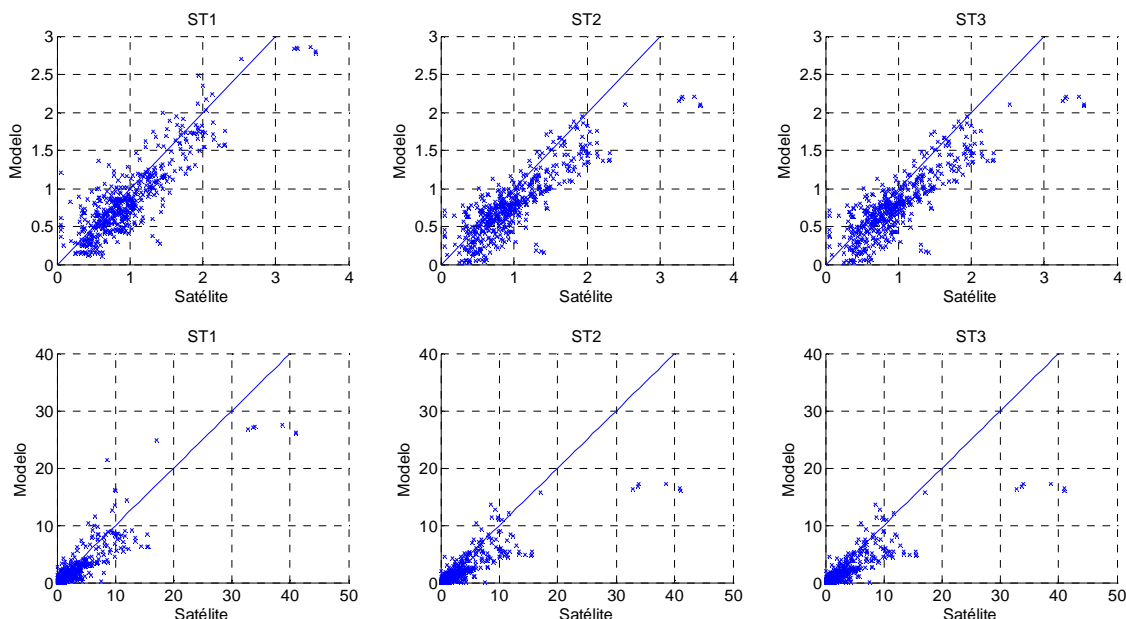


Figura 133.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Región 2. Altura de ola significativa (arriba) y Potencia estimada (abajo).

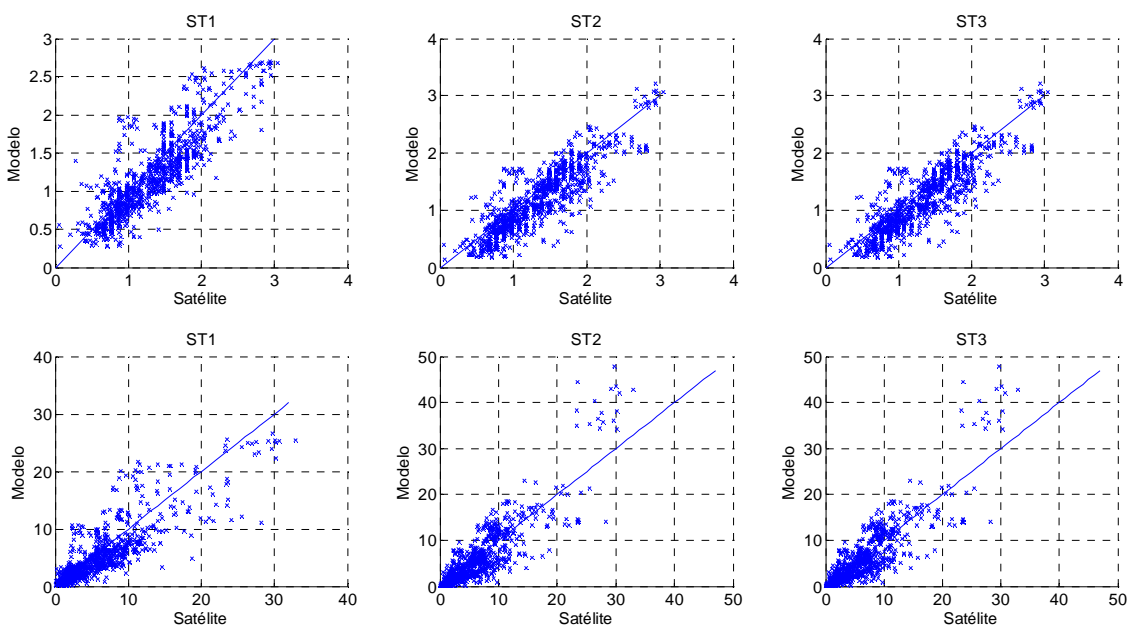


Figura 134.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Región 3. Altura de ola significativa (arriba) y Potencia estimada (abajo).

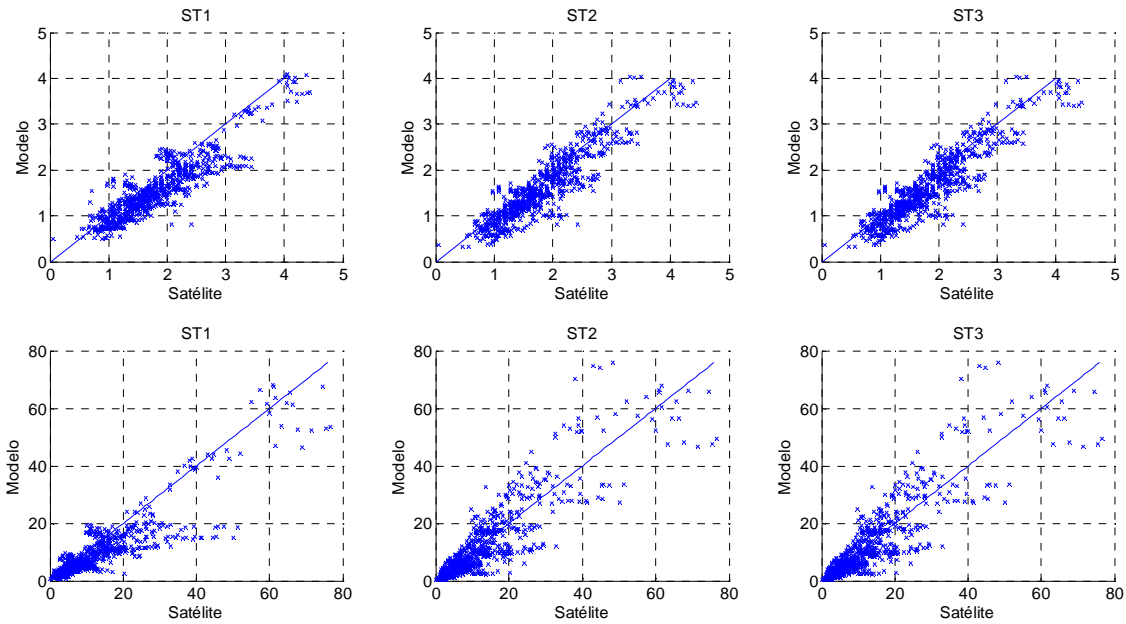


Figura 135.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Región 4. Altura de ola significativa (arriba) y Potencia estimada (abajo).

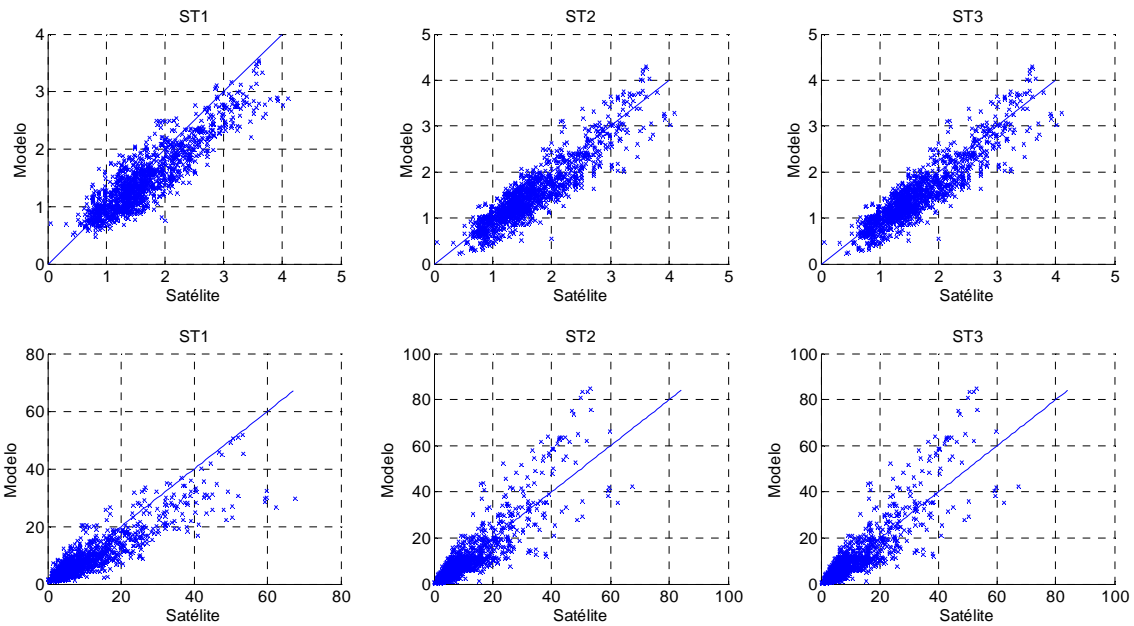


Figura 136.- Diagramas de dispersión. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Región 5. Altura de ola significativa (arriba) y Potencia estimada (abajo).

Tabla 51.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Altura de ola significativa.

	ME(m)			MAE(m)			RMSE(m)			r		
	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3
Región 1	-0,18	-0,26	-0,24	0,22	0,29	0,26	0,27	0,35	0,31	0,80	0,72	0,80
Región 2	-0,12	-0,20	-0,16	0,23	0,27	0,24	0,30	0,35	0,30	0,87	0,85	0,88
Región 3	-0,10	-0,11	-0,11	0,25	0,25	0,24	0,32	0,33	0,31	0,85	0,86	0,87
Región 4	-0,27	-0,24	-0,23	0,35	0,31	0,31	0,43	0,40	0,4	0,90	0,92	0,91
Región 5	-0,19	-0,15	-0,12	0,28	0,25	0,24	0,35	0,31	0,31	0,89	0,92	0,90

Tabla 52.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Potencia estimada.

	ME(kW/m)			MAE(kW/m)			RMSE(kW/m)			r		
	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3	ST1	ST2	ST3
Región 1	-0,72	-0,98	-0,85	0,79	1,01	0,88	1,14	1,44	1,24	0,77	0,65	0,78
Región 2	-0,81	-1,25	-0,73	1,41	1,55	1,33	2,34	3,09	2,33	0,90	0,86	0,9
Región 3	-0,78	-0,14	0,27	2,10	2,27	2,11	3,08	3,46	3,36	0,86	0,89	0,89
Región 4	-3,54	-1,29	-0,81	4,62	4,47	4,04	7,07	6,70	6,16	0,89	0,89	0,9
Región 5	-2,07	-0,07	0,45	3,19	3,31	3,11	5,08	5,55	5,0	0,89	0,89	0,88

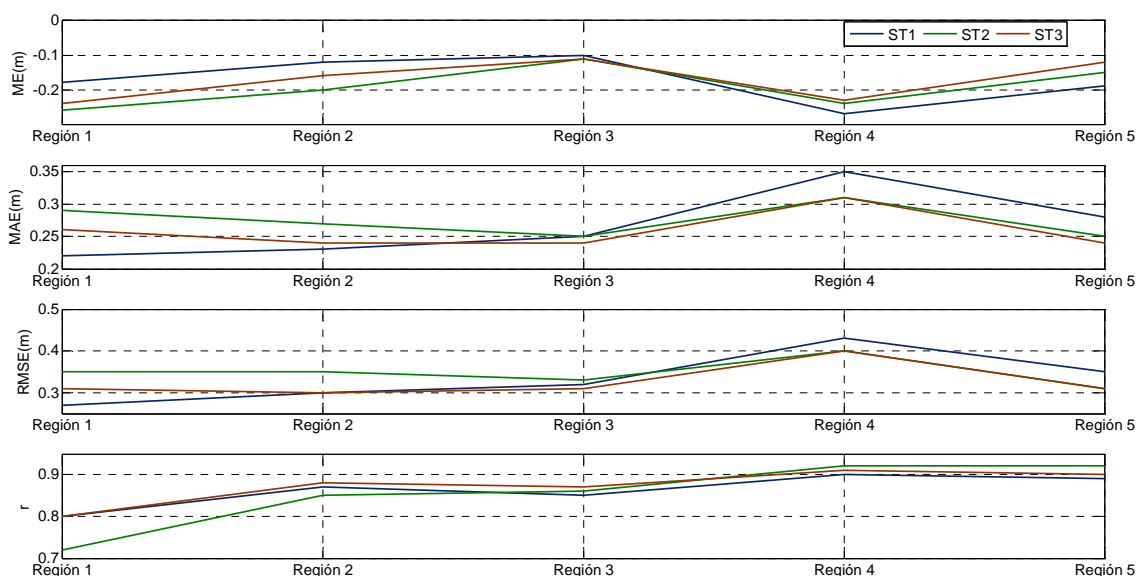


Figura 137.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Altura de ola significativa.

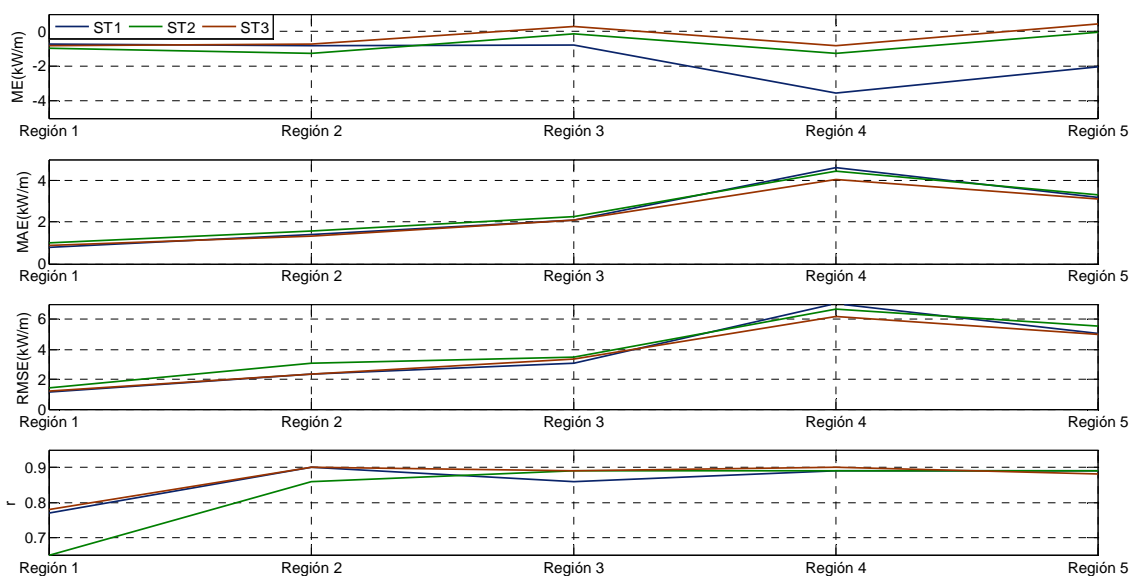


Figura 138.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Análisis comparativo. Datos satelitales vs. Modelo. Potencia estimada.

Se observa que en la Región 1, los valores de H_s y potencia estimada obtenidos del modelo, con las tres simulaciones, son sensiblemente menores que los datos satelitales. En esta zona predomina ampliamente el oleaje local, el cual es consecuencia directa del viento local. En el modelo, el viento local en la Región 1 está dado por los puntos de la grilla del Reanálisis NCEP-

CFSR que se marcan en rojo en la Figura 139. Estos puntos de grilla están o tienen puntos vecinos en el continente y como se mostró en el apartado 3.1 presentan una tendencia a subestimar la intensidad del viento sobre el agua. Se entiende que este es el motivo principal de las diferencias obtenidas entre los resultados del modelo y los datos satelitales correspondientes a la Región 1

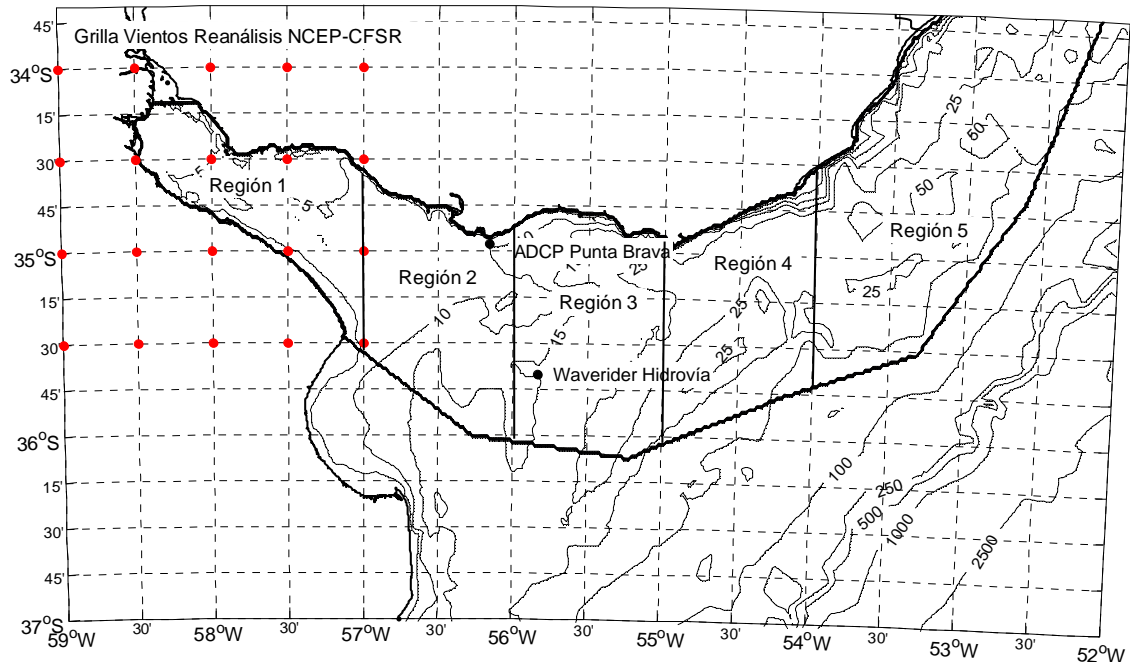


Figura 139.-Puntos de grilla Reanálisis NCEP-CFSR que definen el viento local en la Región 1.

Sin embargo las diferencias observadas en la Región 1 se reducen significativamente en las demás regiones, obteniéndose para las mismas, una muy buena concordancia entre los resultados del modelo y los datos satelitales. En lo que respecta a la comparación entre las tres simulaciones, en las regiones 3, 4 y 5 la mejor representación de Hs, tomando los datos satelitales como válidos, se obtuvo con ST3. Cabe destacar que las regiones 3, 4 y 5 corresponden a la zona exterior del estuario y a la plataforma continental, zonas de mayor potencial undimotriz y por ende de mayor interés para el proyecto.

4.4.4 Conclusiones

En términos generales, con las tres simulaciones, se obtuvo una buena representación tanto de los distintos parámetros calculados a partir de las mediciones in-situ así como de los datos satelitales.

El principal problema observado en las tres simulaciones fue la subestimación del oleaje en la zona interior del estuario (Región 1, Figura 111), la cual queda de manifiesto en los diagramas de dispersión y en los valores negativos de los errores medios obtenidos para Hs. Se entiende que esto se debe a la subestimación de la intensidad del viento sobre el agua por parte de los datos de entrada al modelo correspondientes a los puntos de grilla en dicha zona. Estos puntos de grilla del reanálisis NCEP-CFSR están sobre el continente o tienen sus vecinos en el continente y como se mostró en el apartado 3.1 presentan una tendencia a subestimar la intensidad del viento sobre el agua. Otro problema común a las tres simulaciones, identificado a partir de la comparación del período y dirección pico con los datos del ADCP, es una

subestimación del mar de fondo en las zonas medias e interior del estuario. Se entiende que esto se debe a un déficit en la representación del proceso de disipación por fondo por parte del modelo, ya que la misma nunca considera la presencia de barro en el lecho. Mejorar los resultados del modelo para esta zona del estuario implica corregir estos dos problemas. Como en dicha zona el potencial undimotriz es bajo, se postergó la mejora en pos de enfocarse en la buena representación del oleaje en la parte exterior del estuario y fundamentalmente en la plataforma continental, zonas de mayor potencial undimotriz y por lo tanto de mayor interés para el proyecto.

Comparando los resultados de las tres simulaciones con el propósito de optar por una, se destaca que:

- La mejor representación de los datos de la boya Waverider se obtuvo con ST1 y ST3.
- La mejor representación de los datos satelitales en las regiones 3, 4 y 5 se obtuvo con ST3.

Se considera a este último punto como el de mayor relevancia, pues es válido para un amplio dominio que se corresponde con la zona de interés del proyecto. Por lo tanto, se optó por el paquete de parametrizaciones ST3 para representar en el modelo URU-WAVE el proceso de aporte de energía por el viento y los procesos disipativos que no involucran al fondo. Posteriormente, se realizó la calibración del modelo, buscando mejorar los resultados, ajustando los parámetros involucrados en esta parametrización.

4.5 Calibración

Mediante la etapa de calibración se buscó mejorar los resultados del modelo ajustando el coeficiente de disipación (C_{ds}) que interviene en la parametrización del proceso de disipación por *white-capping* del paquete ST3. Los resultados del modelo se compararon con los datos satelitales de altura de ola significativa correspondientes a las regiones 3, 4 y 5 (Figura 111). Se trabajó con el período 1/1/2005 - 30/6/2005.

Se utilizaron los datos satelitales porque permiten analizar los resultados del modelo en un amplio dominio. Se utilizó solamente el parámetro H_s por ser la única medida directa de los datos satelitales altimétricos. Se consideraron las regiones 3, 4 y 5 (Figura 111) por abarcar la zona de mayor interés para el proyecto.

El coeficiente de disipación que se considera por defecto y que se utilizó en el análisis comparativo es $C_{ds}=-2.1$. Se realizaron distintas simulaciones variando C_{ds} en el entorno de su valor por defecto. Los mejores resultados se obtuvieron para $C_{ds}=-1.5$. Los mismos se presentan a continuación en la Figura 140, Figura 141 y en la Tabla 53.

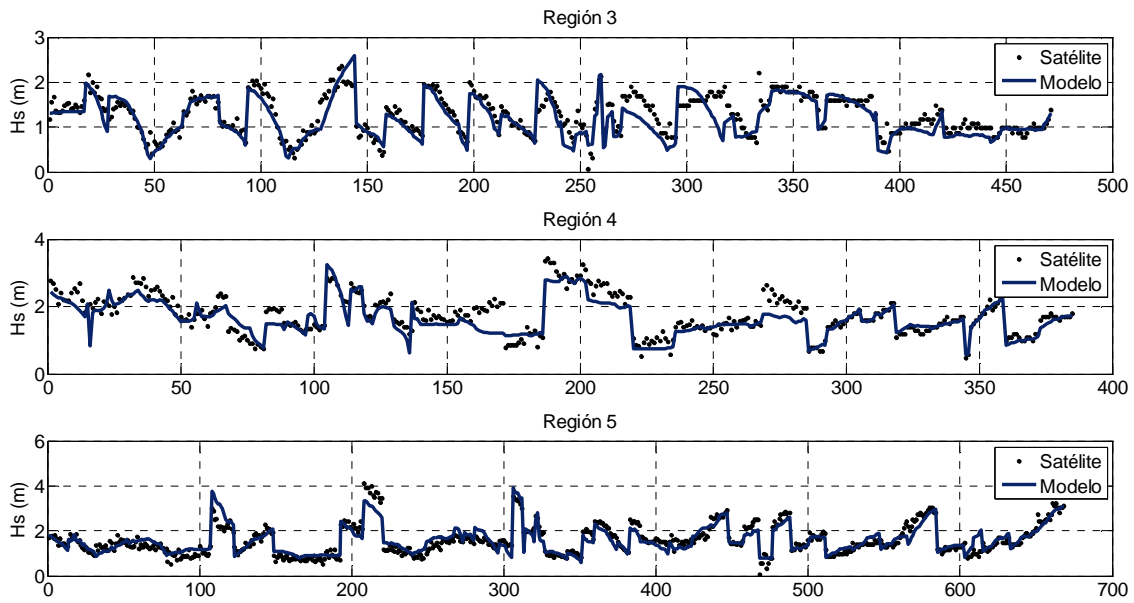


Figura 140.-Comparación de series. Etapa de calibración. Datos satelitales vs. Modelo. Altura de ola significativa. Regiones 3,4 y 5.

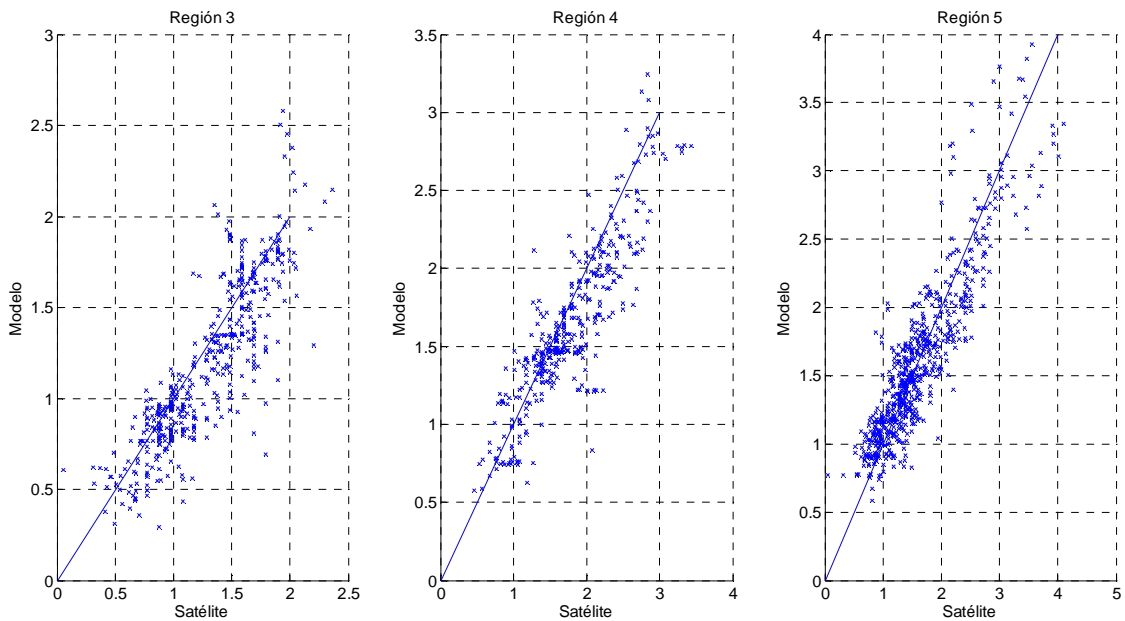


Figura 141.- Diagramas de dispersión. Etapa de calibración. Datos satelitales vs. Modelo. Altura de ola significativa. Regiones 3,4 y 5.

Tabla 53.- Descriptores estadísticos de las diferencias. Etapa de calibración. Datos satelitales vs. Modelo. Altura de ola significativa.

	ME(m)	MAE(m)	RMSE(m)	r
Región 3	-0.09	0.18	0.25	0.86
Región 4	-0.12	0.22	0.3	0.88
Región 5	0	0.22	0.29	0.9

4.6 Resultados

Con el modelo calibrado se realizaron simulaciones de los años comprendidos en el período 1980-2010. Las salidas del modelo son los campos de altura de ola significativa (H_s), período medio (T_m), dirección media (θ_m), dispersión angular respecto a la dirección media (σ_θ), período pico (T_p), dirección pico (θ_p) y potencia del oleaje, así como los espectros completos en las boyas virtuales indicadas en la Figura 105. Tanto los campos como los espectros son obtenidos cada 3 horas.

A modo de ejemplo y con la intención de mostrar la simulación de distintos estados de mar que se presentan en la costa atlántica, en la Figura 142, Figura 143 y Figura 144 se presentan los resultados del modelo correspondientes al antes, durante y después de la tormenta del 23 y 24 de agosto del 2005. La evolución de la tormenta con una frecuencia temporal de 6 horas se presenta en el Anexo 8¹⁸.

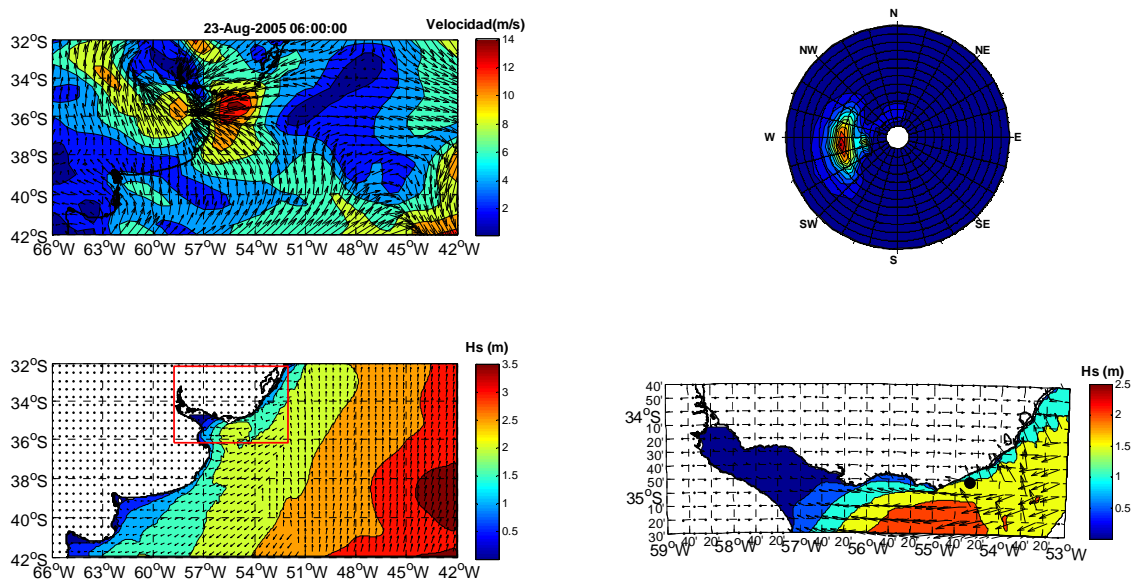


Figura 142.-Salidas del modelo. 23/8/2005 06:00 UTC. Campo de vientos (sup.-izq.), oleaje en grilla Reg5- (inf.-izq.), espectro en boya virtual B15 (sup.-der.)y oleaje en grilla loc1.5 (inf.-,der.).

El espectro de la Figura 142, antes que la tormenta comience a manifestarse, muestra un estado de mar donde convive un oleaje local en desarrollo de dirección E y un mar de fondo de dirección sur. El mismo es producto del viento del este con velocidades medias que alcanzan los 15 m/s que se observa en la costa uruguaya y del mar de fondo del sur cuya presencia se observa en el dominio regional al este del meridiano 54W. En el espectro que se presenta, correspondiente a la boya virtual B15, se observa un predominio del oleaje local, pero en boyas más al este se obtuvo un predominio del mar de fondo.

¹⁸ Simular eventos extremos utilizando los datos del reanálisis constituye una primera aproximación al problema. Una representación más ajustada requiere necesariamente considerar una resolución temporal y espacial de los campos de viento (datos de entrada al modelo) que se corresponda con las escalas del fenómeno meteorológico.

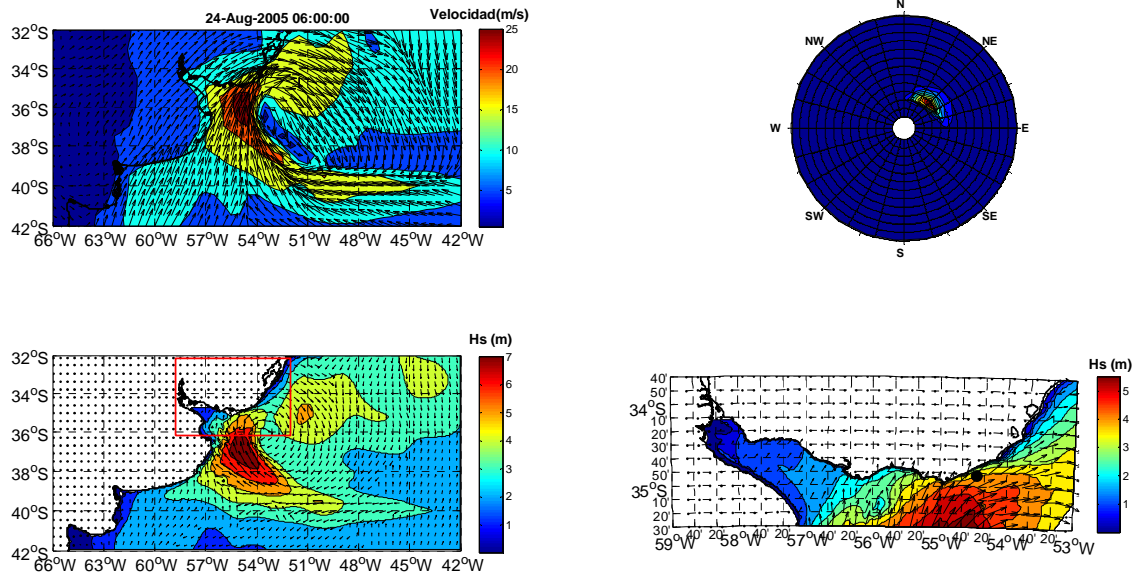


Figura 143.- Salidas del modelo. 24/8/2005 06:00 UTC

En la Figura 143 se observa que la tormenta se encuentra ingresando a la costa atlántica, con vientos del SW de gran intensidad que generan un oleaje del SW que alcanza alturas de ola significativa que llegan a los 5 m y continúan en aumento. El espectro muestra un oleaje local desarrollado que se propaga en la dirección del viento.

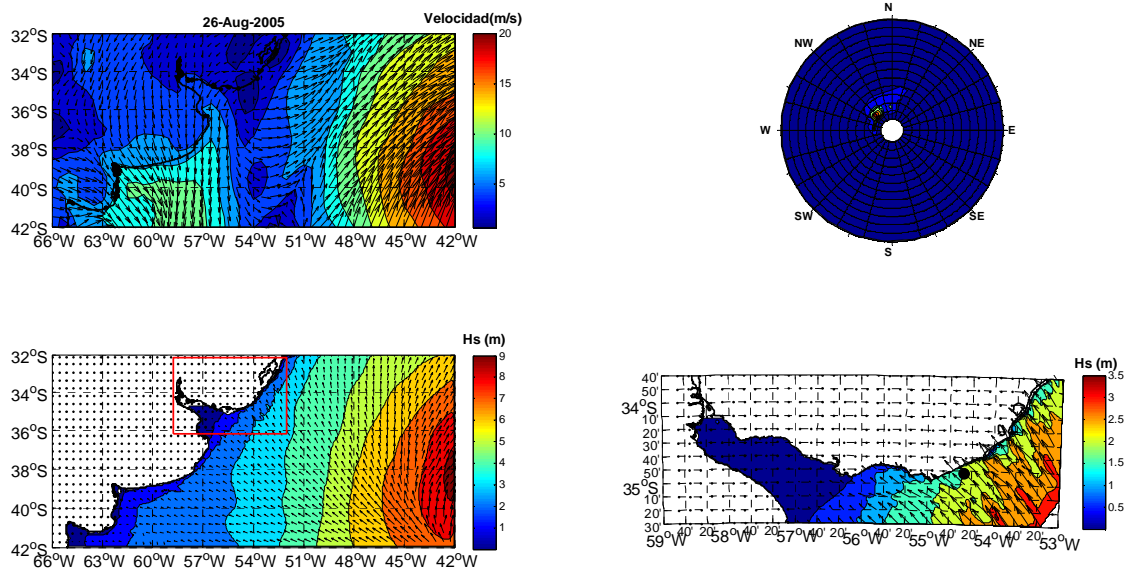


Figura 144.- Salidas del modelo. 26/8/2005. 00:00 UTC.

Finalmente el espectro de la Figura 144, correspondiente a un día después de la tormenta, es un espectro típico de un mar de fondo en el que la energía se presenta concentrada en una frecuencia baja y en una dirección bien marcada. En la grilla regional se observa que este mar de fondo ingresa del SE.

Con los resultados del modelo se determinó el clima de olas en cada una de las boyas virtuales consideradas. Los climas obtenidos en las boyas en donde también se cuenta con mediciones in-situ se compararon con los climas obtenidos a partir de los datos medidos. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 145, Figura 146 y Figura 147.

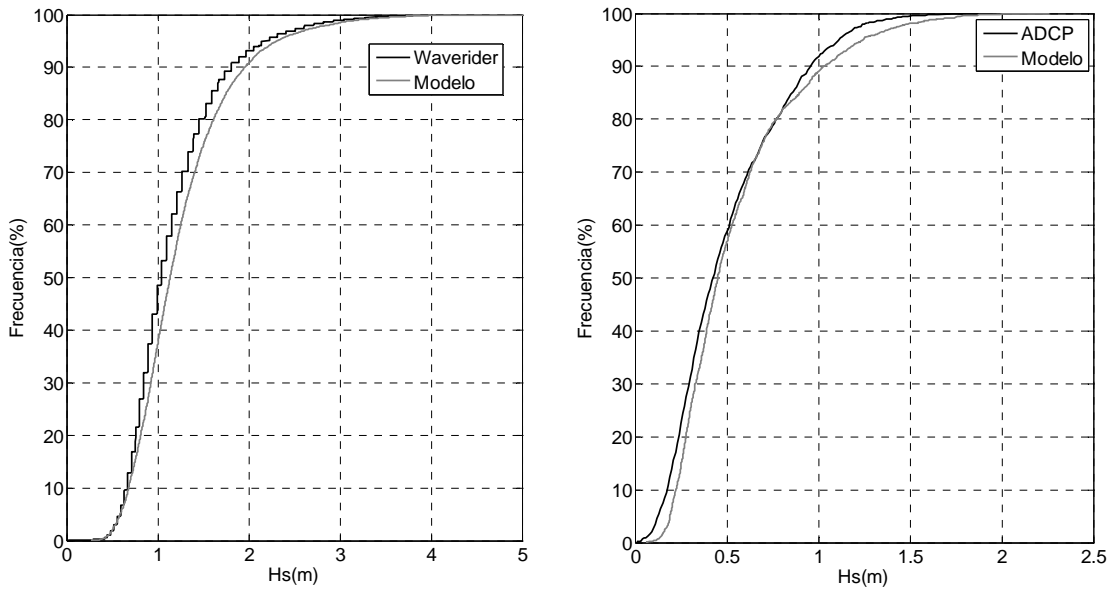


Figura 145.- Comparación de la distribución empírica de frecuencias acumuladas de altura de ola significativa obtenidas como resultado del modelo y obtenidas a partir de la boya Waverider (izq.) y del ADCP (der.)

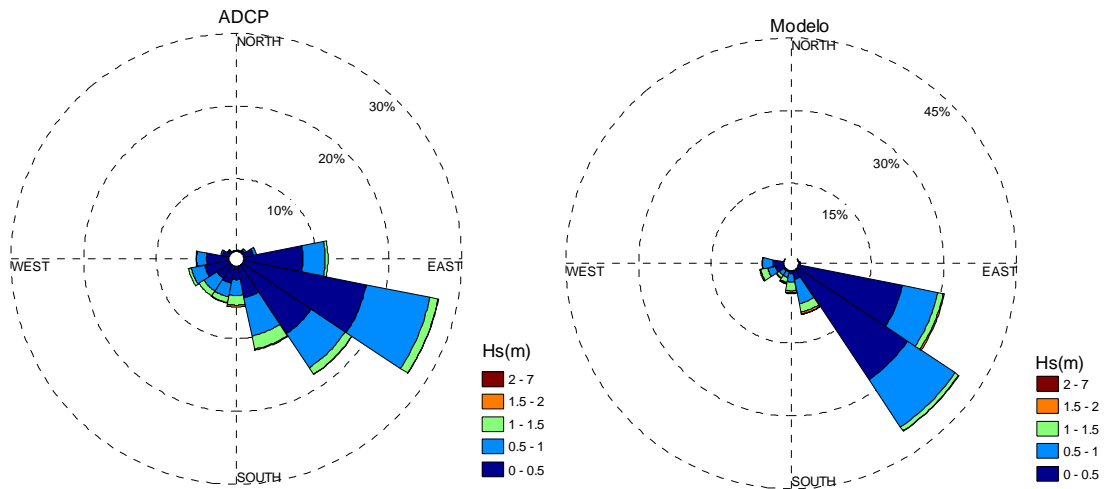


Figura 146.-Comparación entre la rosa de oleaje obtenida a partir del modelo en el punto donde mide el ADCP y obtenida mediante los datos del ADCP.

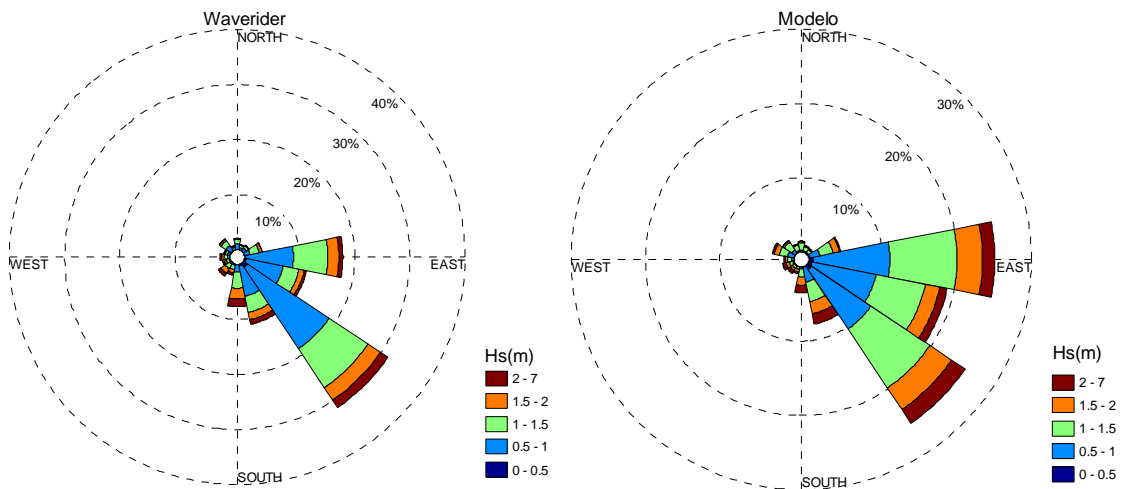


Figura 147.- Comparación entre la rosa de oleaje obtenida a partir del modelo en el punto donde mide la boya Waverider y obtenida mediante los datos del Waverider.

Se observa que los resultados del modelo reproducen adecuadamente los climas de olas obtenidos a partir de los datos de la boya Waverider y del ADCP. Las diferencias que se observan en las rosas de oleaje correspondientes al ADCP se explican por los mismos argumentos planteados en el apartado 4.5. Es decir, una subestimación de la energía del oleaje local producto de una subestimación de la intensidad del viento en la zona interior del estuario y una posible sobreestimación del mar de fondo por la representación simplificada del proceso de disipación por fondo. Esto hace que se obtenga a partir del modelo, donde mide el ADCP, una mayor frecuencia de ocurrencia del oleaje SE, dirección característica del mar de fondo.

Los resultados correspondientes a las restantes boyas se presentan en los diagramas de cajas de la Figura 148, en los gráficos de la Figura 149 y en las rosas de oleaje de la Figura 150. En el Anexo 9 se presenta el clima de olas en cada boya de forma más detallada.

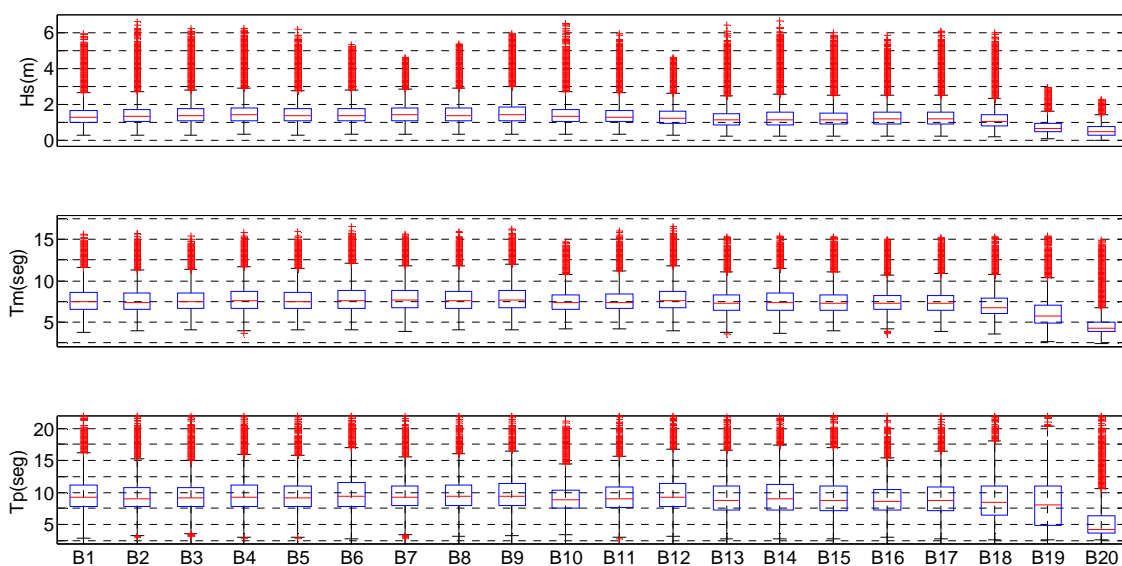


Figura 148.-Diagramas de cajas de: Hs (arriba), T_{m01} (medio y T_p (abajo) obtenidos a partir de los resultados del modelo en las boyas virtuales B1 a B20.

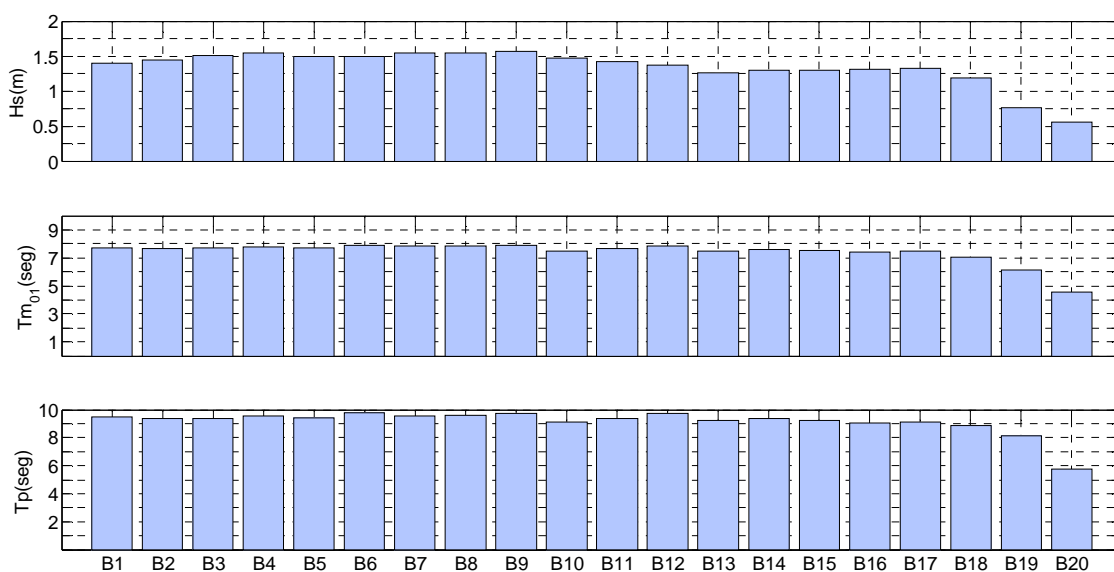


Figura 149.-Valores promedio de Hs (arriba), T_{m01} (medio y T_p (abajo) obtenidos a partir de los resultados del modelo en las boyas virtuales B1 a B20.

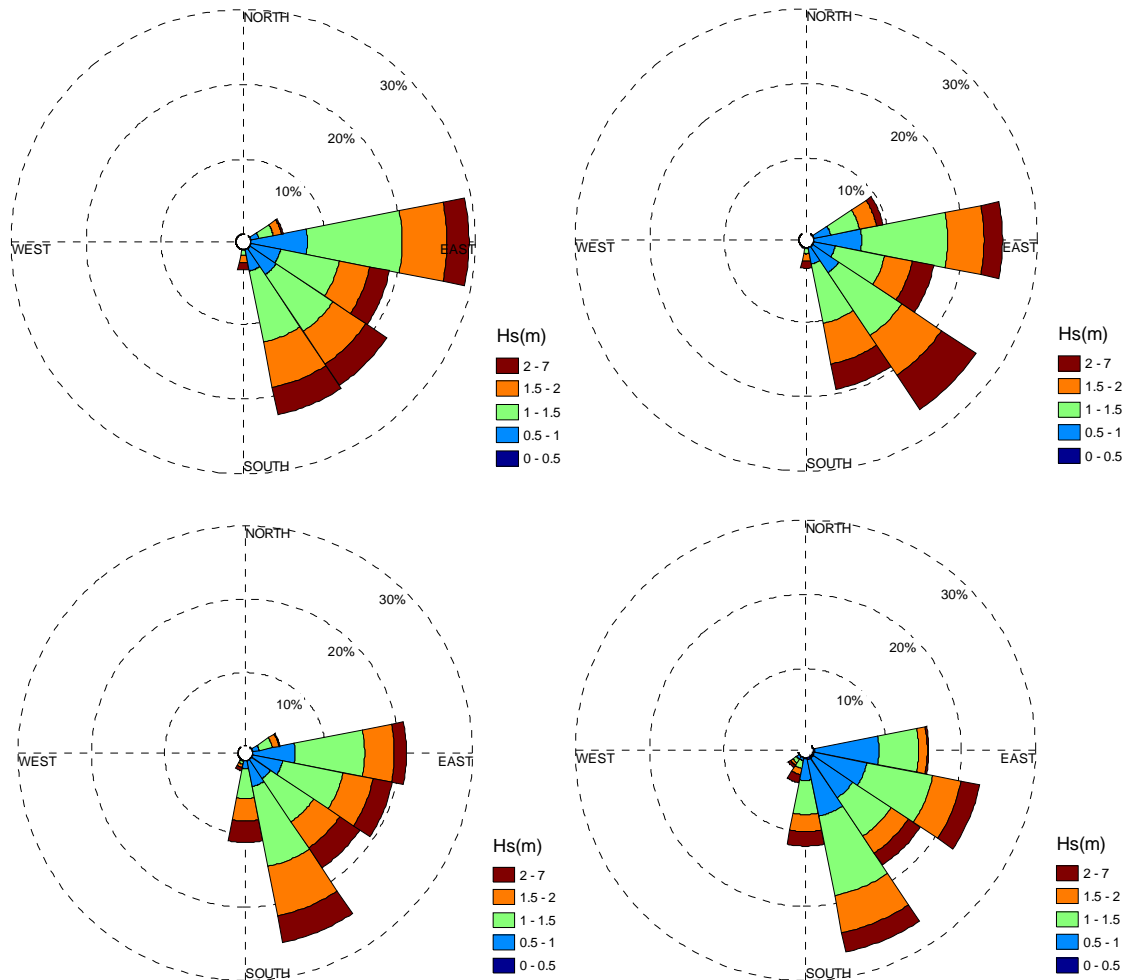


Figura 150.- Rosas de oleaje correspondientes a las boyas virtuales B2(sup-izq), B6(sup-der), B10(inf-izq) y B15(inf-der)

Se aprecia una diferencia significativa entre las boyas virtuales localizadas en el estuario (B18, B19 y B20) respecto a las boyas virtuales ubicadas en la costa atlántica. Siendo los valores tanto de H_s como T_{m01} y T_p menores en el estuario que en la costa atlántica. En lo que respecta a las boyas de la costa atlántica (B1 a B17), no se aprecian diferencias significativas en el período medio y pico, pero si se observan algunas pequeñas diferencias en lo que refiere a la altura de ola significativa y a la dirección del oleaje. El período T_{m01} se encuentra, mayoritariamente, entre 6 y 9 segundos, mientras que T_p se encuentra mayoritariamente entre 8 y 12 segundos. Por su parte, H_s , entre Punta del Este y La Paloma (B13 a B17), se encuentra mayoritariamente entre 1 y 1,6 m, presentando valores medios de 1,25 m aproximadamente. Estos valores son levemente inferiores a los que se obtuvieron al este de La Paloma (B1 a B12), donde H_s se encuentra mayoritariamente entre 1 y 2 m presentando valores medios próximos a 1,5 m. En cuanto a las direcciones, en todas las boyas se obtuvo que el oleaje proviene mayoritariamente del cuadrante E-S. En las boyas B1 a B12 se aprecia también la ocurrencia de oleaje proveniente del ENE el cual prácticamente no se aprecia en el resto de las boyas. Mientras que en las boyas B13 a B20 se aprecia la ocurrencia de oleaje del cuadrante S-W que no se aprecia en las boyas localizadas al este de La Paloma.

CAPÍTULO V

**CARACTERIZACIÓN DEL
POTENCIAL UNDIMOTRIZ**

5 Caracterización del potencial undimotriz

En este capítulo se presentan las características del recurso undimotriz en Uruguay obtenidas a partir de los resultados de la simulación del período 1980-2010 con el modelo URU-WAVE. En el apartado 5.1 se presenta el potencial del recurso a través de un mapa de potencia media. A su vez, para cada boya virtual, se presenta la permanencia temporal de los distintos niveles de potencia del oleaje, la frecuencia de ocurrencia de estados de mar con determinada potencia y la distribución del potencial entre distintos estados de mar caracterizados por rangos de altura de ola significativa y período pico. En el apartado 5.2 se presentan las características direccionales del recurso, mientras que en el apartado 5.3 se presentan los resultados obtenidos al calcular una serie de parámetros definidos a los efectos de caracterizar cuan dispersa se presenta la energía en el dominio de las frecuencias y direcciones. A continuación, en el apartado 5.4 se presenta la variación estacional del recurso, en el apartado 5.5 se presenta la variación interanual y finalmente en el apartado 5.6 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos.

5.1 Potencial del recurso

En la Figura 151 se presenta el mapa de potencia media del oleaje obtenido a partir de los resultados de la grilla local del modelo. Con los resultados de la grilla regional y global se confeccionó el mapa regional que se presenta en el Anexo 10.

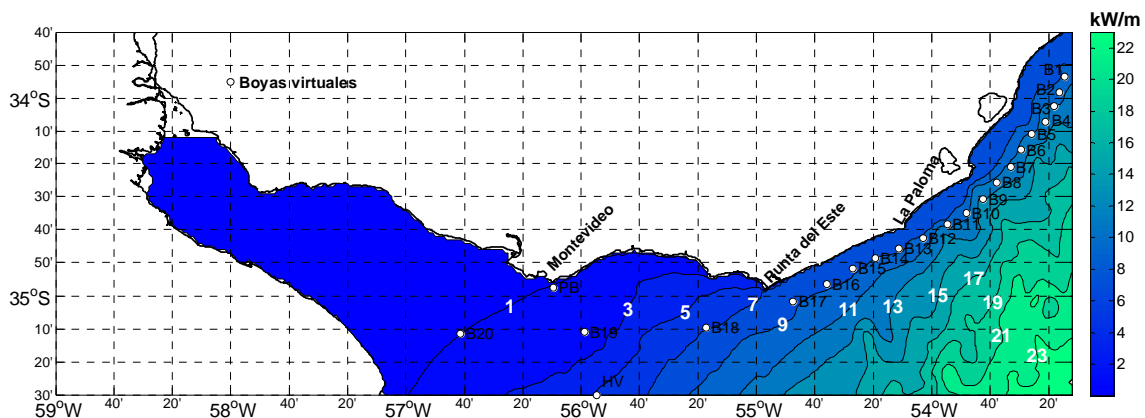


Figura 151.- Mapa de potencia media

En la plataforma continental se observa que la potencia del oleaje presenta un gradiente de dirección NW-SE perpendicular a la línea de costa¹⁹ y al talud continental. Este gradiente coincide con la tendencia regional y se intensifica debido a la disipación de la energía del oleaje conforme disminuye la profundidad. De esta forma, se tiene una potencia media de 20 kW/m a una distancia de 70 km del arco de costa La Paloma - Cabo Polonio y a profundidades de entre 15 y 25 metros, donde fueron ubicadas las boyas virtuales, la potencia media del oleaje se encuentra entre 10.4 y 13.8 kW/m. Por otra parte, dentro del estuario, se observa que la potencia del oleaje disminuye fuertemente siendo el potencial undimotriz un orden menor.

Los resultados en las proximidades de la costa, donde la batimetría cambia bruscamente y no es representada adecuadamente con la resolución espacial del modelo, deben ser tomados como una referencia primaria. Obtener una caracterización detallada del potencial undimotriz

¹⁹ Considerando su orientación a gran escala

en un punto específico de la costa se puede realizar tomando como condición de borde los espectros de la boya virtual más próxima e implementando un modelo con información batimétrica detallada de la zona.

La mediana, cuartil inferior, cuartil superior y potencia media del oleaje en las boyas virtuales se presenta en la Figura 152 y en la Tabla 54.

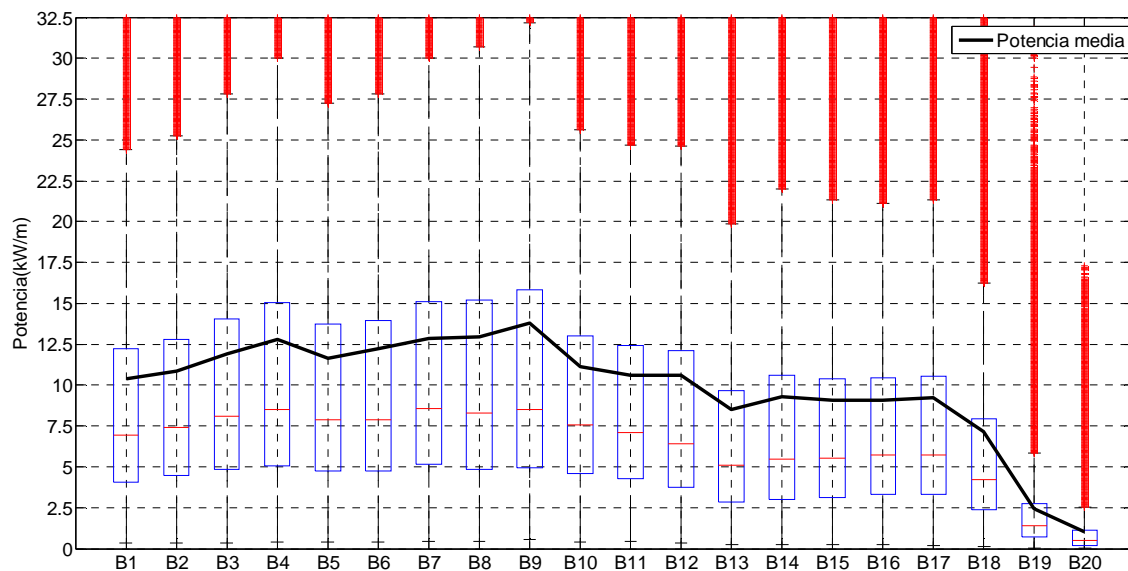


Figura 152.- Diagrama de cajas de la potencia del oleaje obtenida en las boyas virtuales

Tabla 54.-Potencia del oleaje obtenido en las boyas virtuales. Cuartiles, mediana y promedio expresados en kW/m

	Cuartil inferior	Mediana	Cuartil superior	Promedio
B1	4.1	6.9	12.2	10.4
B2	4.5	7.4	12.8	10.8
B3	4.8	8.1	14.0	11.9
B4	5.1	8.5	15.0	12.8
B5	4.7	7.9	13.7	11.7
B6	4.7	7.9	14.0	12.2
B7	5.1	8.6	15.1	12.8
B8	4.9	8.3	15.2	13.0
B9	4.9	8.5	15.8	13.8
B10	4.6	7.6	13.0	11.1
B11	4.3	7.1	12.4	10.6
B12	3.7	6.4	12.1	10.6
B13	2.9	5.1	9.7	8.5
B14	3.0	5.5	10.6	9.3
B15	3.1	5.5	10.4	9.1
B16	3.3	5.8	10.4	9.1
B17	3.3	5.8	10.5	9.2
B18	2.4	4.2	7.9	7.1
B19	0.7	1.4	2.7	2.4
B20	0.2	0.5	1.1	1.0

Se observa que los promedios son sensiblemente mayores que las medianas como era de esperar en una variable positiva que puede adoptar valores muchos mayores²⁰ que sus valores medios.

Dejando de lado las boyas virtuales B18, B19 y B20, ubicadas en el estuario y en las que nuevamente se observa como el potencial undimotriz decae fuertemente, se distinguen en la plataforma dos tramos tomando La Paloma como referencia para la divisoria. Las boyas virtuales B1 a B12, (tramo La Paloma - Chuy) presentan un potencial undimotriz mayor que las boyas virtuales B13 a B17, (tramo Punta del Este - La Paloma). Una explicación a esta diferencia radica en el oleaje de direcciones E y NE. Este oleaje ocurre frecuentemente y como se puede apreciar en la salida del modelo correspondiente al 16/6/2005 12:00 UTC (Figura 153), llega con mayor energía al tramo B1-B12 que al tramo B13-B17.

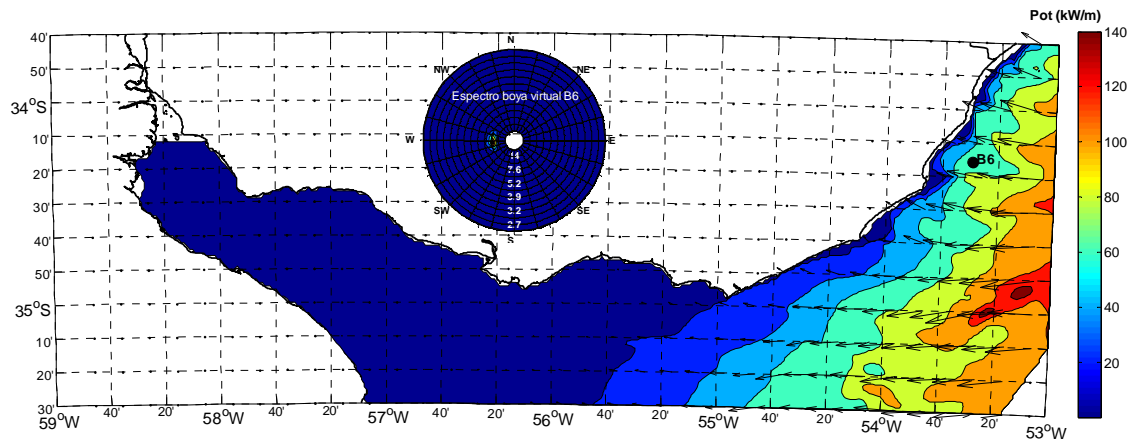


Figura 153.-Potencia del oleaje y dirección pico. Salida del modelo correspondiente al 16/6/2005 12:00 UTC.

A su vez, en el tramo B1-B13, se observa que el mayor potencial undimotriz tiene lugar en las boyas B4 a B9. La referencia en la costa de este tramo son los arcos de playa comprendidos entre Cabo Polonio y Punta del Diablo. Una posible explicación a esta observación estaría vinculada al pozo que se identifica en la batimetría (Figura 154) y que haría que la disipación del oleaje que alcanza este tramo sea menor que la disipación del oleaje que alcanza los tramos contiguos. De la batimetría también se desprende otro motivo por el cual el potencial undimotriz decrece en el tramo B13-B17. Siguiendo la isobata 30m, se aprecia que el oleaje que alcanza este tramo en general se propaga por zonas de menor profundidad que el que alcanza el tramo B1-B12, siendo mayor la disipación de energía debido a la interacción con el fondo.

Integrando los resultados de potencia media presentados en la Tabla 54 en la línea que une las boyas B1 a B17, se obtiene que la energía del oleaje media anual en la costa atlántica a una profundidad de entre 15 y 25 m es de 19.3 TWh. Este valor equivale a 2.2 GW de potencia media y duplica el actual consumo de energía eléctrica del país.

²⁰ Durante los eventos de tormenta

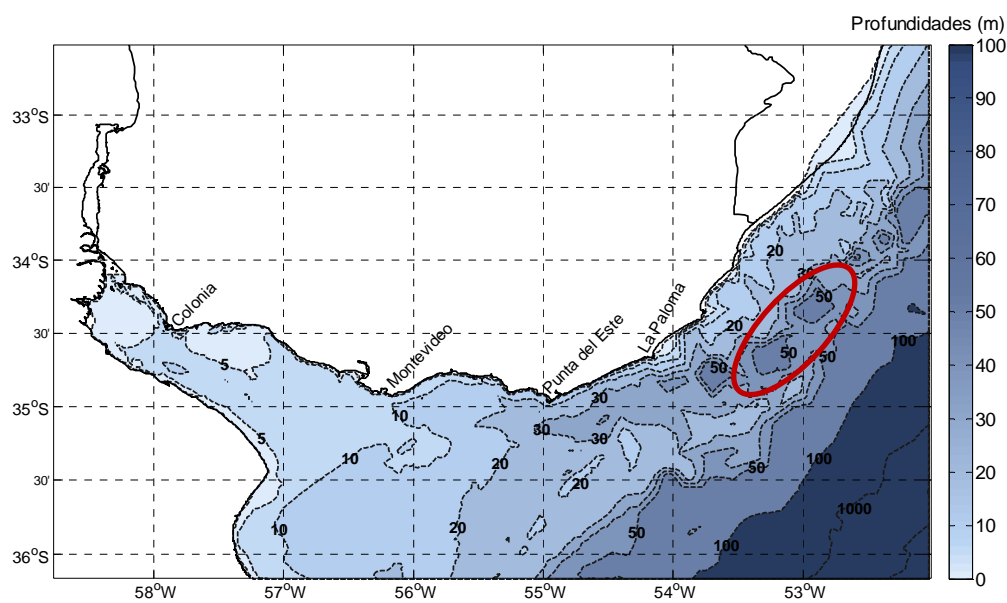


Figura 154.- Batimetría de la grilla local LOC1.5-. En rojo se señala el pozo.

En la Figura 155 se presentan los histogramas y distribuciones empíricas de frecuencias acumuladas de la potencia del oleaje en las boyas virtuales B2, B6, B10 y B16. Para el resto de las boyas virtuales estos resultados se presentan en el Anexo 11.

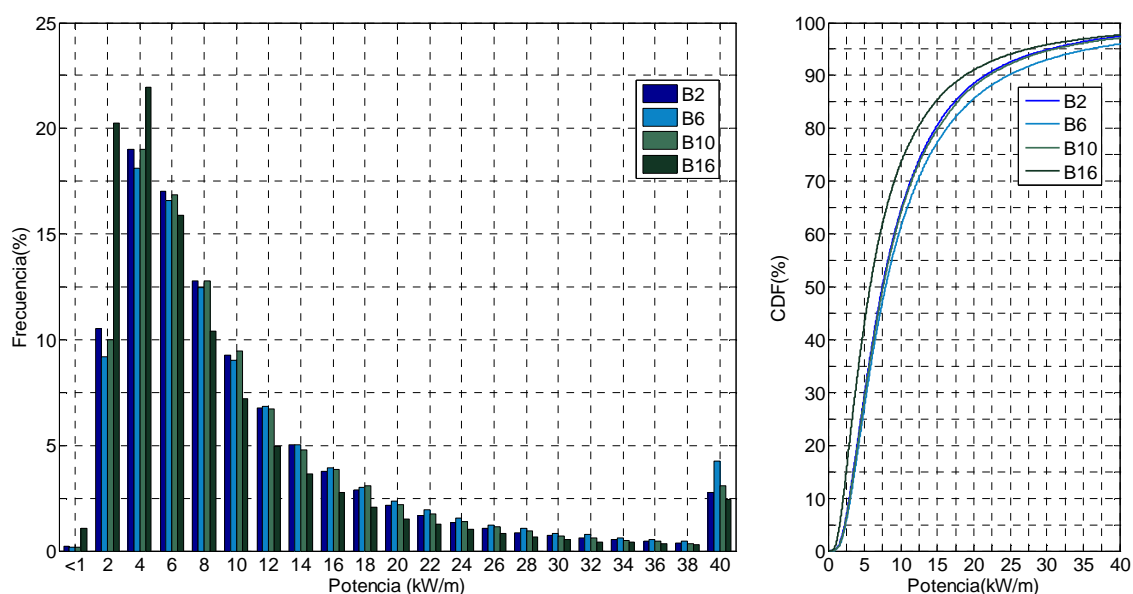


Figura 155.- Histogramas (izq.) y distribución empírica de frecuencias acumuladas (der.) de la potencia del oleaje en las boyas B2, B6, B10 y B16.

Como era esperable en base a lo expuesto en los párrafos anteriores, se observa que el potencial undimotriz de la boya B16, ubicada en el tramo Punta del Este - La Paloma, es menor que el de las boyas virtuales B2, B6 y B10 ubicadas en el tramo La Paloma - Chuy. A su vez el mayor potencial entre estas tres boyas se obtuvo en B6, la cual está ubicada en el tramo Cabo Polonio - Punta del Diablo. Por otra parte, se observa que para valores de potencia del oleaje menores a 8 kW/m, las distribuciones empíricas de frecuencias acumuladas correspondientes a B2, B6 y B10 son similares y a partir de dicho valor comienzan a diferenciarse. Lo que muestra que la diferencia entre B6 y B2-B10 se establece en las condiciones de oleaje de mayor intensidad.

Caracterización del potencial undimotriz

En las tablas 55, 56, 57 y 58 se presenta la distribución en altura de ola significativa y período pico del potencial undimotriz correspondiente a las boyas B2, B6, B10 y B16. Las tablas correspondientes al resto de las boyas se presentan en el Anexo 11. Las tablas presentan la frecuencia de ocurrencia y la energía media anual correspondiente a cada combinación de alturas de ola significativa y períodos pico. Este tipo de análisis permite identificar las condiciones de oleaje que los dispositivos de conversión deberían especialmente considerar.

Tabla 55.-Distribución de la energía undimotriz media anual en Hs y Tp. Boya virtual B2.

		Tp(s)								Total
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	>14	
<0.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	13.0	46.3	95.7	45.2	2.7	1.9	204.8
0.5-1	%Total	0.0%	0.1%	0.8%	6.8%	8.4%	2.2%	1.0%	0.6%	20%
	E(KWh/m)	0.0	51.0	846.7	6736.2	7926.3	2139.8	922.3	609.9	19232.3
1-1.5	%Total	0.0%	0.0%	3.6%	8.4%	17.0%	8.6%	3.4%	1.2%	42%
	E(KWh/m)	0.0	36.5	3299.8	8144.7	15943.9	8031.1	3143.3	1122.5	39721.8
1.5-2	%Total	0.0%	0.0%	1.7%	5.4%	6.4%	5.8%	3.4%	1.0%	24%
	E(KWh/m)	0.0	0.6	1534.0	5065.7	6023.1	5819.5	3356.2	970.8	22769.8
2-2.5	%Total	0.0%	0.0%	0.1%	2.1%	2.4%	2.0%	1.4%	0.7%	9%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	115.8	1931.8	2285.2	1691.4	1276.0	579.7	7879.9
2.5-3	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	1.1%	0.8%	0.5%	0.4%	3%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	3.1	384.7	867.4	770.6	468.1	348.0	2841.9
3-3.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.4%	0.2%	0.2%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	44.4	294.7	298.9	171.5	121.4	930.8
3.5-4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.1%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	1.6	76.9	151.5	69.2	48.4	347.7
>4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	1.2	41.7	140.6	68.3	22.2	274.2
Total		0%	0%	6%	23%	36%	20%	10%	4%	94203.1
		0.0	88.1	5812.3	22356.7	33555.1	19088.6	9477.5	3824.7	

Tabla 56.- Distribución de la energía undimotriz media anual en Hs y Tp. Boya virtual B6

		Tp(s)								Total
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	>14	
<0.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	12.0	29.0	35.4	28.7	21.1	43.9	170.1
0.5-1	%Total	0.0%	0.0%	0.8%	6.0%	6.6%	2.2%	1.6%	1.1%	18%
	E(KWh/m)	0.0	42.0	833.2	6699.9	7575.5	2344.0	1547.5	1263.7	20305.7
1-1.5	%Total	0.0%	0.0%	3.5%	7.8%	14.4%	8.6%	4.5%	2.4%	41%
	E(KWh/m)	0.0	51.1	3841.3	8491.2	15379.8	9510.6	4767.3	2504.3	44545.5
1.5-2	%Total	0.0%	0.0%	1.6%	5.0%	5.5%	6.3%	4.3%	1.5%	24%
	E(KWh/m)	0.0	4.8	1744.7	5627.1	5711.0	6745.8	4898.7	1713.9	26446.2
2-2.5	%Total	0.0%	0.0%	0.1%	2.1%	2.0%	2.3%	2.2%	1.0%	10%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	93.5	2178.8	2118.8	2373.8	2322.8	1137.9	10225.5
2.5-3	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	1.0%	0.9%	0.9%	0.6%	4%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	1.9	464.6	948.7	878.4	840.1	564.4	3698.2
3-3.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%	0.4%	0.3%	0.3%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	54.1	370.8	334.9	306.5	257.5	1323.9
3.5-4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.2%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	3.3	93.7	152.0	147.8	123.2	520.0
>4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.2%	0.2%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	0.6	46.9	182.8	130.4	146.7	507.5
Total		0%	0%	6%	21%	30%	21%	14%	7%	107742.4
		0.0	97.9	6526.6	23548.8	32280.6	22551.0	14982.1	7755.5	

Tabla 57.- Distribución de la energía undimotriz media anual en Hs y Tp. Boya virtual B10

		Tp(s)								Total
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	>14	
<0.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	20.3	26.5	82.1	33.6	2.7	0.5	165.7
0.5-1	%Total	0.0%	0.0%	1.0%	7.0%	7.8%	1.8%	0.8%	0.5%	19%
	E(KWh/m)	0.0	31.3	987.9	7228.9	7561.8	1587.1	793.3	426.1	18616.4
1-1.5	%Total	0.0%	0.0%	3.6%	10.2%	17.3%	7.9%	2.6%	0.8%	42%
	E(KWh/m)	0.0	24.1	3559.7	9479.4	17142.4	7268.5	2383.3	773.8	40631.1
1.5-2	%Total	0.0%	0.0%	1.5%	6.5%	6.4%	5.8%	2.9%	0.7%	24%
	E(KWh/m)	0.0	3.3	1442.4	6260.3	5966.7	6007.9	2892.7	629.6	23202.8
2-2.5	%Total	0.0%	0.0%	0.1%	2.7%	2.6%	2.0%	1.2%	0.5%	9%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	79.7	2474.5	2424.2	1882.3	1208.1	478.6	8547.4
2.5-3	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	1.2%	0.8%	0.4%	0.3%	3%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.3	492.0	1091.2	710.0	387.1	294.7	2975.3
3-3.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	0.4%	0.2%	0.2%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	44.4	416.4	269.8	175.7	146.0	1052.3
3.5-4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.1%	0.1%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	6.0	156.3	147.8	71.3	66.2	447.7
>4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	0.0	55.4	158.8	88.9	36.1	339.2
Total		0.0%	0.1%	6.2%	27.0%	36.3%	19.1%	8.4%	3.0%	95977.9
		0.0	58.8	6090.2	26011.9	34896.5	18065.8	8003.1	2851.6	

Tabla 58.- Distribución de la energía undimotriz media anual en Hs y Tp. Boya virtual B16

		Tp(s)								Total
		<2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	>14	
<0.5	%Total	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.3%	0.1%	0.0%	0.0%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.8	36.8	155.0	189.6	82.0	25.5	8.0	497.7
0.5-1	%Total	0.0%	0.1%	2.5%	11.1%	11.1%	4.4%	1.7%	0.9%	32%
	E(KWh/m)	0.0	75.4	2067.3	9254.5	8132.5	3636.1	1328.7	672.2	25166.5
1-1.5	%Total	0.0%	0.0%	4.0%	10.9%	11.6%	9.0%	3.1%	0.8%	39%
	E(KWh/m)	0.0	21.0	3118.6	8714.1	8917.7	7055.8	2412.4	623.2	30862.8
1.5-2	%Total	0.0%	0.0%	0.9%	5.5%	3.3%	4.1%	2.7%	0.5%	17%
	E(KWh/m)	0.0	0.1	758.7	4260.1	2559.4	3436.8	2172.3	412.8	13600.1
2-2.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%	1.5%	1.2%	1.0%	0.4%	6%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	26.8	1707.7	1174.2	795.2	673.5	285.6	4663.1
2.5-3	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	0.8%	0.5%	0.3%	0.2%	2%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	2.6	465.3	593.3	337.6	313.5	140.2	1852.6
3-3.5	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	0.2%	0.2%	0.1%	1%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	67.9	391.7	136.1	97.3	52.9	745.9
3.5-4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	3.3	144.0	78.7	64.3	26.8	317.1
>4	%Total	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0%
	E(KWh/m)	0.0	0.0	0.0	1.3	67.3	75.6	58.3	17.6	220.2
Total		0%	0%	8%	31%	29%	20%	9%	3%	77925.9
		0.0	97.4	6010.8	24629.3	22169.5	15633.9	7145.8	2239.2	

En todas las boyas de la plataforma continental se obtuvo que el 70% de la energía media anual del oleaje corresponde a estados de mar con alturas de ola significativa entre 0.5 y 2 m y períodos pico entre 6 y 12 s.

5.2 Análisis direccional

En la Figura 156 se presentan las rosas de potencia y la distribución direccional de la energía media anual correspondientes a las boyas virtuales B2, B6, B10 y B16, mientras que para el resto de las boyas estos mismos gráficos se presentan en el Anexo 11.

En términos generales se observa que las olas que contribuyen mayoritariamente al potencial undimotriz provienen del cuadrante E-S.

Caracterización del potencial undimotriz

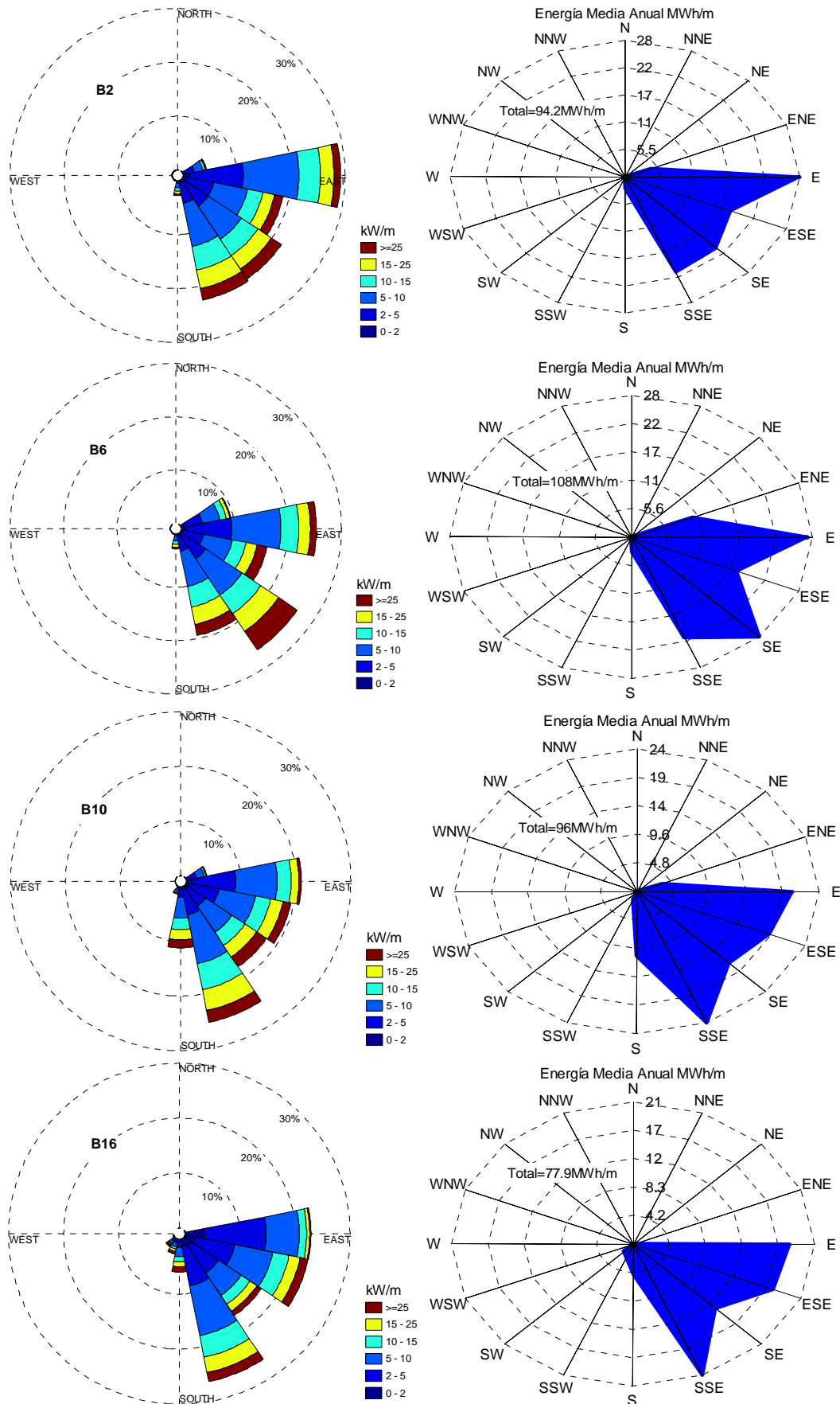


Figura 156.-Rosas de potencia y distribución direccional de la energía en las boyas virtuales B2,B6,B10 y B16.

Dada una dirección de referencia y un estado de mar, Crabb (1984) definió el parámetro factor direccional (FD) a los efectos de cuantificar la proporción de la potencia total del estado de mar que traspasa un plano perpendicular a la dirección de referencia. Por lo tanto, FD es función del espectro $E(f, \theta)$ y de la dirección de referencia (θ_{ref}) y se calcula con la siguiente expresión:

$$FD = \frac{\int_0^{\infty} \int_{\theta_{ref}-\frac{\pi}{2}}^{\theta_{ref}+\frac{\pi}{2}} E(f, \theta) C_g(f) \cos(\theta - \theta_{ref}) d\theta df}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} E(f, \theta) C_g(f) d\theta df} \quad [5.1]$$

Con los estados de mar obtenidos en las boyas virtuales se calculó FD para cada dirección. En la Figura 157 se presenta el factor direccional medio correspondiente a cada dirección y a cada boya.

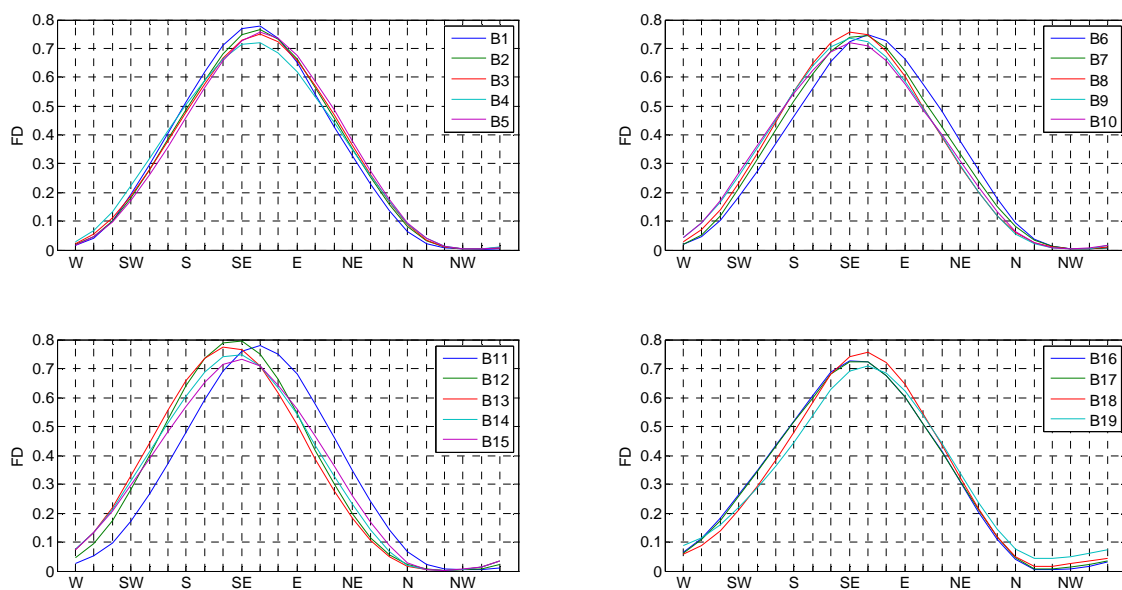


Figura 157. Factor direccional medio calculado para cada una de las boyas virtuales.

Se obtuvieron resultados similares en todas las boyas, con valores máximos entre 0.7 y 0.8 correspondientes a las direcciones SE y ESE. En base a este resultado, se entiende que si se instala un dispositivo de conversión del tipo terminador o totalizador a profundidades de 15-25 m el mismo debe orientarse al SE - ESE y el potencial que dispondría se restringe al 70 - 80 % del potencial total.

Otro parámetro que brinda información sobre las características direccionales del recurso es el flujo medio de energía. Si se considera la potencia del oleaje como una magnitud vectorial cuya dirección y sentido queda definida por la dirección pico, el flujo medio de energía se calcula como el vector promedio de dicha magnitud. Los resultados obtenidos en cada boya se presentan en la Figura 158.

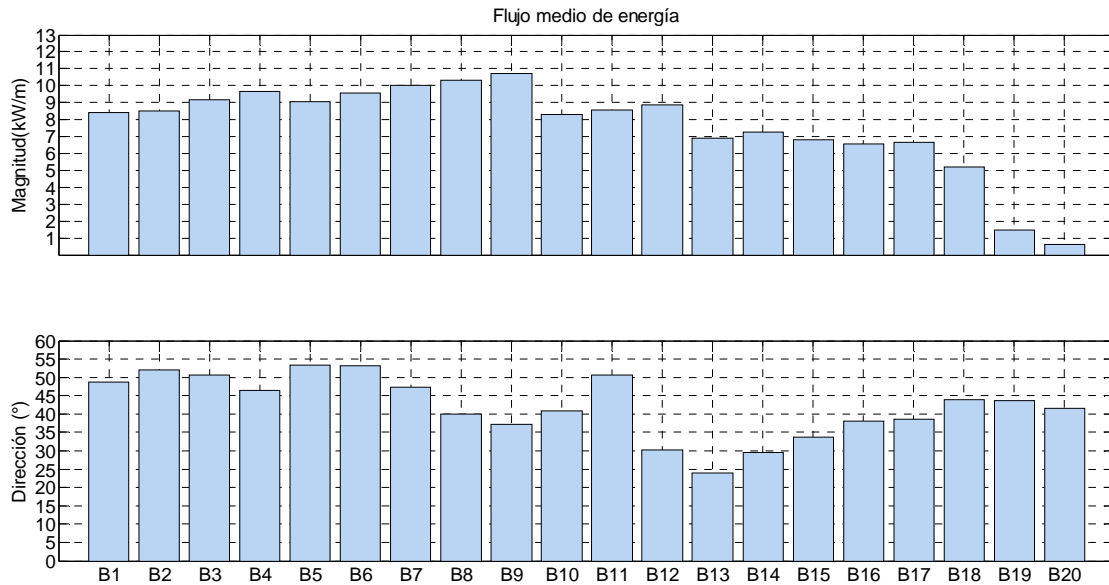


Figura 158.- Flujo medio de energía. Magnitud (arriba) y Dirección (abajo) a la que apunta el vector, medida desde el norte en sentido anti-horario.

Se observa que la dirección del flujo medio de energía varía en el entorno de los 45° lo que se corresponde con la dirección SE, rotando levemente hacia el Este para las boyas B1 a B7 (Chuy-Cabo Polonio) y hacia el sur para las boyas B8-B17 (Cabo Polonio - Punta del Este).

5.3 Dispersión típica en frecuencias y direcciones

En base a lo propuesto en Crabb (1984), se calcularon dos parámetros que brindan información sobre cuán dispersa se presenta la energía de un estado de mar, ya sea en el dominio de las frecuencias o períodos, como en el de las direcciones. Para cuantificar la dispersión en el dominio de las frecuencias o períodos, se define la anchura en períodos (TW) como la diferencia entre los períodos T_{90} y T_{10} . Los mismos, se definen de forma tal que las olas del estado de mar con períodos mayores a T_{90} contribuyen con solamente el 10 % de la potencia total del estado de mar, mientras que la contribución de las olas con períodos menores a T_{10} también es del 10 %. Por lo tanto, las olas con períodos entre T_{10} y T_{90} aportan el 80 % de la potencia del estado de mar y TW es la diferencia entre estos dos períodos. De esta forma, cuanto más irregular es el oleaje mayor es TW. Análogamente, la anchura direccional (DW) es el ángulo que conforman las dos direcciones entre las cuales se concentra el 80 % de la potencia del estado de mar.

Estos parámetros fueron calculados para cada estado de mar obtenido en cada una de las boyas virtuales. En la Figura 159 se presentan los valores promedio y diagramas de cajas correspondientes a las series de TW obtenidas en cada boya. De la misma forma, en la Figura 160 se presentan los resultados correspondientes a DW.

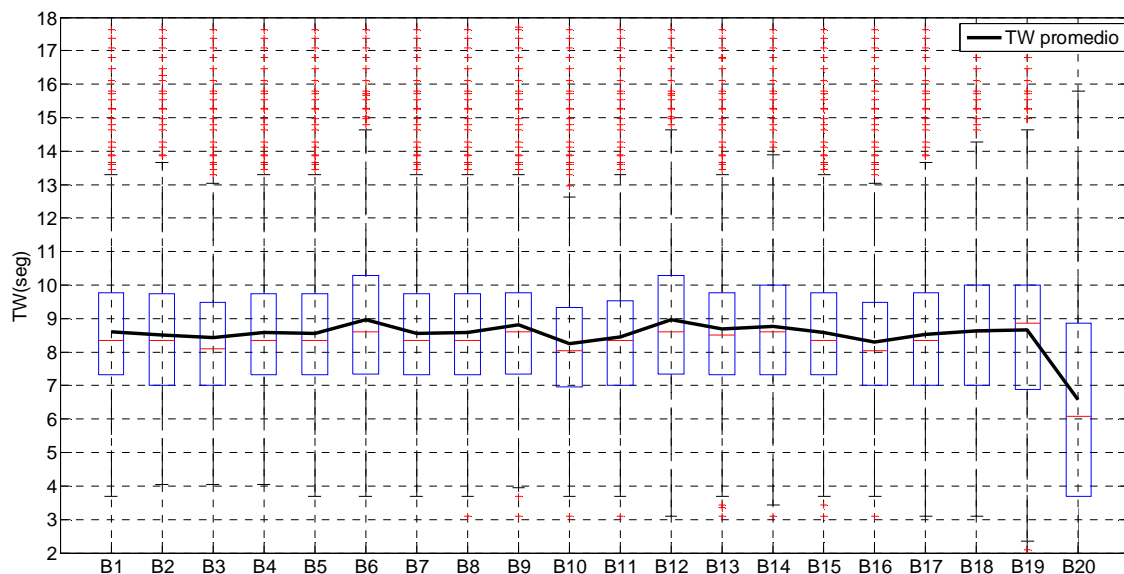


Figura 159.- Anchura en periodo (TW). Promedio mediana y cuartiles correspondientes a las distintas boyas virtuales.

No se aprecian diferencias significativas entre las distintas boyas ubicadas en la plataforma continental, estando sus valores promedios comprendidos entre 8 y 8.5 segundos.

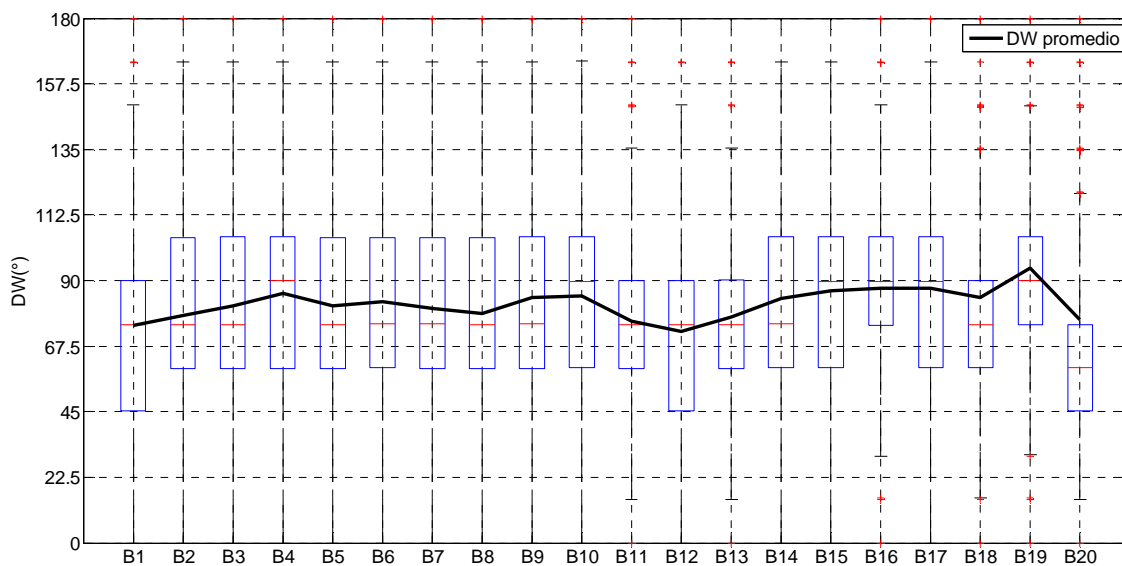


Figura 160.- Anchura direccional (DW). Promedio mediana y cuartiles correspondientes a las distintas boyas virtuales.

En cuanto a la anchura direccional, tampoco se aprecian diferencias significativas entre las boyas, estando los valores promedios comprendidos entre 75° y 85°.

5.4 Variación estacional

En la Figura 161 se presentan los mapas de potencia media correspondientes a los trimestres enero-febrero-marzo (EFM), abril-mayo-junio (AMJ), julio-agosto-setiembre (JAS) y octubre-noviembre-diciembre (OND). En el Anexo 10 se presentan los mapas regionales de potencia media para cada uno de estos trimestres.

Caracterización del potencial undimotriz

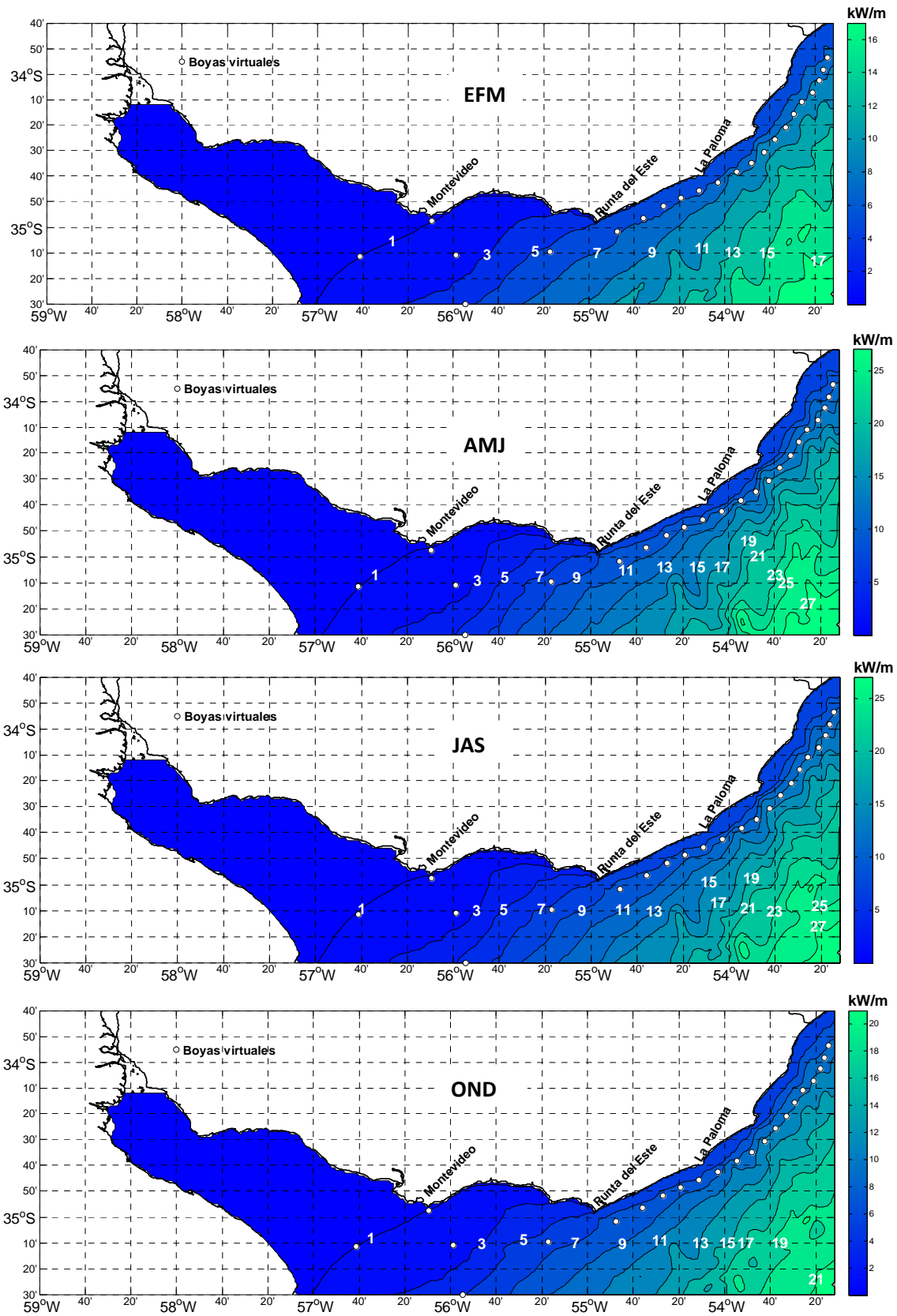


Figura 161.- Mapa de potencia media por estaciones

En la Figura 162 se presentan los promedios por trimestre de la potencia media, anchura en período y anchura direccional en cada una de las boyas virtuales, mientras que en la Figura 163 se presenta el flujo medio de energía obtenido en cada boya para los distintos trimestres. Finalmente en la Figura 164 se presentan, para cada trimestre, las rosas de potencia y distribución direccional de la energía obtenidas a partir de los resultados en la boya virtual B6.

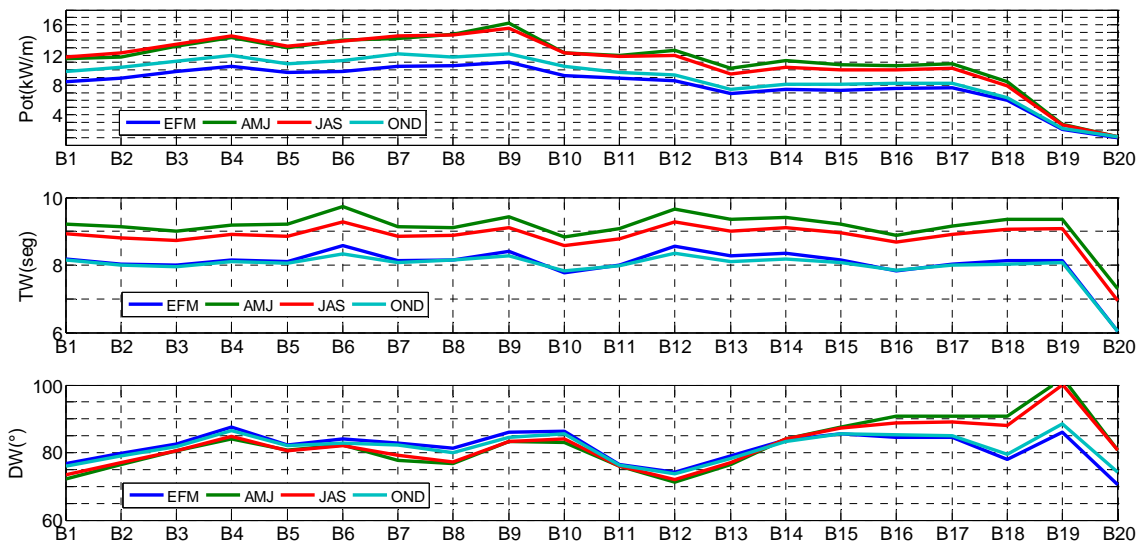


Figura 162.- Potencia media, anchura en período media y anchura direccional media por estaciones. Boyas virtuales.

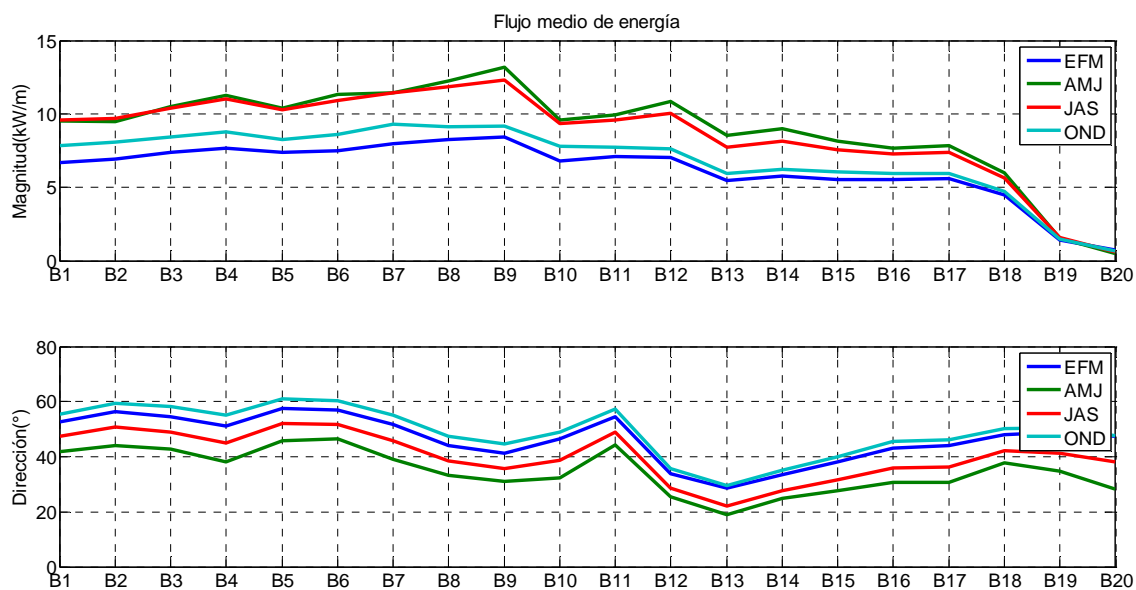


Figura 163.- Flujo medio de energía por estaciones. Boyas virtuales.

Caracterización del potencial undimotriz

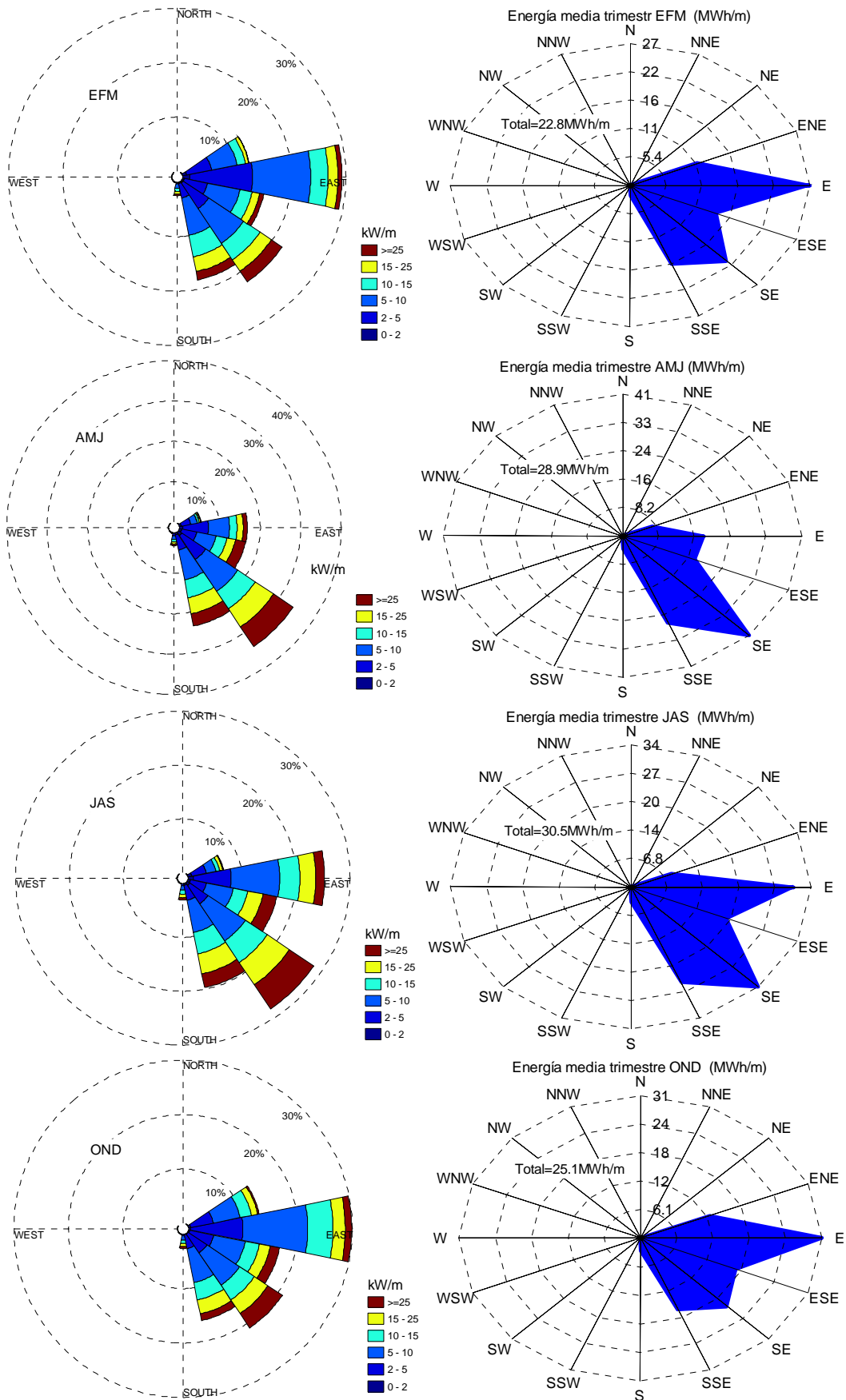


Figura 164.-Rosas de potencia y distribución direccional de la energía por estaciones en la boya virtual B6.

Se observa que las estaciones de otoño e invierno (AMJ y JAS) presentan un potencial undimotriz mayor que las estaciones de primavera y verano (OND Y EFM). Esta diferencia entre las estaciones cálidas y frías también se aprecia a nivel regional (Ver Anexo 10) y está vinculada a la variación estacional de la circulación atmosférica del Atlántico Sur. A partir de los espectros obtenidos en la boya virtual B6, se obtuvo que el 56% de la energía undimotriz media anual se debe al oleaje que tiene lugar en otoño e invierno, lo que muestra que si bien existe una diferencia, la misma es moderada.

También se apreciaron diferencias entre las estaciones frías y cálidas en lo que respecta a la anchura en períodos y a la dirección del flujo medio de energía. En cuanto a TW se obtuvo que en otoño e invierno es mayor que en primavera y verano, lo que estaría indicando que, en términos medios, el oleaje de las estaciones frías es más irregular que el de las estaciones cálidas. Por su parte, las diferencias en la dirección media del flujo de energía muestran que el oleaje del este tiene un mayor peso en primavera - verano que en otoño - invierno, lo cual se verifica con las rosas de potencia de la Figura 164.

5.5 Variación interanual

En la Figura 165 se presenta la potencia media anual obtenida a partir de los espectros en la boya virtual B6 de los 31 años comprendidos en el período 1980-2010.

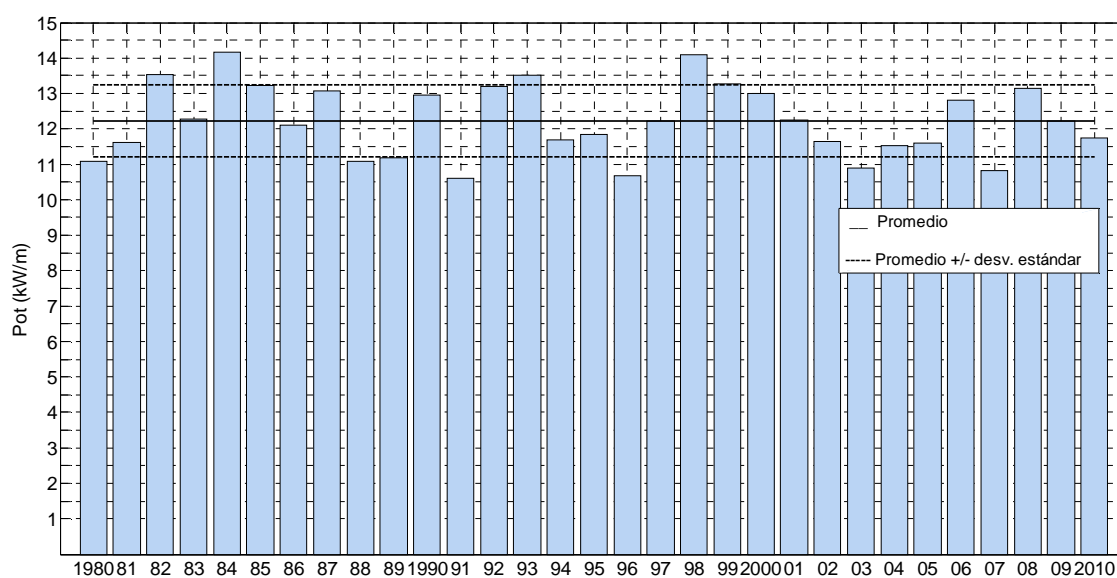


Figura 165.- Potencia media anual. Boya virtual B6.

Se obtuvo que la desviación estándar de la potencia media anual es menor que el 10% de su valor promedio, lo cual muestra claramente que la variación interanual de la energía del oleaje es poco significativa.

5.6 Síntesis de resultados

En la plataforma continental los principales resultados obtenidos se resumen en los siguientes puntos:

- A profundidades en el entorno de los 20 metros y a lo largo de los 200 km de costa atlántica, la energía media anual del oleaje es de 19.3 TWh.
- A 70 km de la costa se cuenta con una potencia media de 20 kW/m y a 200 km de la costa, sobre el talud continental, la potencia media es de 30 kW/m.
- A profundidades en el entorno de los 20 metros, el tramo La Paloma - Chuy presenta un mayor potencial undimotriz que el tramo La Paloma - Punta del Este y dentro del primero, el mayor potencial se identificó en el tramo Cabo Polonio - Punta del Diablo.
- A profundidades en el entorno de los 20 metros en el tramo La Paloma - Chuy se obtuvieron valores de potencia media que varían entre 10.4 y 13.8 kW/m, mientras que en el tramo La Paloma - Punta del Este se obtuvieron valores que varían entre 8.5 y 9.3 kW/m.
- El oleaje que contribuye mayoritariamente al potencial undimotriz se caracteriza por presentar alturas de ola significativa entre 0.5 y 2 m, períodos pico entre 6 y 12 segundos y provenir del cuadrante E-S.
- La dirección del flujo medio de energía varía en el entorno de la dirección SE, rotando levemente hacia el Este en el tramo Chuy - Cabo Polonio y hacia el sur en el tramo Cabo Polonio - Punta del Este.
- En cuanto a la variación estacional, se obtuvo que el 56 % de la energía media anual se debe al oleaje que tiene lugar en otoño e invierno. Por otra parte, se observa que en las estaciones de primavera y verano el oleaje del este tiene un mayor peso relativo en la distribución direccional de la energía que en las estaciones de otoño e invierno.
- En cuanto a la variación interanual del recurso, se destaca que la misma es poco significativa, siendo la desviación estándar de la potencia media anual menor al 10% de su valor promedio.

En el estuario la potencia del oleaje disminuye fuertemente siendo un orden menor que en la plataforma continental.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6 Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó una caracterización del potencial undimotriz de Uruguay a partir de la obtención mediante modelación numérica de treinta años de estados de mar en la plataforma continental atlántica y el estuario del Río de la Plata. Para ello fue necesario el procesamiento y análisis de toda la información disponible para la zona de estudio de oleaje y viento sobre el mar, así como la implementación del modelo de generación y propagación del oleaje WAVEWATCH III. Al modelo implementado se lo llamó URU-WAVE manteniendo el nombre del proyecto en el cual se enmarca este trabajo.

Los datos de viento incorporados al modelo fueron los datos del reanálisis NCEP-CFSR. Previo a su incorporación, se realizó un análisis comparativo, aplicando distintos métodos estadísticos, de estos datos con los datos disponibles de mediciones del viento en el mar y en estaciones costeras. Los resultados obtenidos muestran que los datos del reanálisis NCEP-CFSR constituyen una buena representación del viento sobre el mar, a los efectos de utilizarlos en la determinación del clima de oleaje a partir de modelación.

Se analizaron los datos de oleaje obtenidos a partir de dos puntos de medición in-situ disponibles en la zona de estudio. Estos dos puntos de medición están ubicados dentro del estuario. Los resultados obtenidos muestran que la potencia promedio en la ubicación de la boya Waverider de Hidrovía (zona exterior del estuario) es de 5 kW/m, mientras que donde está ubicado el ADCP (próximo a Montevideo) es de 0.9 kW/m. Estos resultados dan indicios de lo que luego se verificó en la modelación, en cuanto a que la energía del oleaje presenta un fuerte decaimiento adentrándose en el estuario.

La información del oleaje en la plataforma continental atlántica se obtuvo a partir de los datos medidos remotamente desde satélites mediante la técnica de altimetría con radar. Se realizó un análisis de estos datos contrastándolos con las mediciones in-situ, obteniéndose excelentes resultados en lo que respecta a la altura de ola significativa. Como el período no constituye una estimación directa de los radares altimétricos, se lo estimó a partir de la expresión propuesta por Govindan et.al. (2011) y al contrastarlos con las mediciones in-situ también se observaron buenos resultados.

Como el WAVEWATCH III brinda la posibilidad de optar entre distintas parametrizaciones para representar el proceso de aporte de energía por el viento y los procesos disipativos que no involucran al fondo, se implementó el modelo con las distintas opciones disponibles y se realizó un análisis comparativo de los resultados. Si bien, en términos generales, con las tres implementaciones se obtuvieron buenos resultados, con el paquete de parametrizaciones identificado como ST3 (WAM4 y sus variantes) se obtuvieron los menores errores y los mayores coeficientes de correlación en lo que respecta a la altura de ola significativa en la zona exterior del estuario y la plataforma continental. Por lo tanto se optó por el mismo en la implementación del modelo URU-WAVE.

Posteriormente se llevó a cabo la calibración del modelo, ajustando el coeficiente de disipación por *white-capping* (C_{ds}). La mejor representación de la altura de ola significativa en la zona exterior del estuario y en la plataforma continental se obtuvo con $C_{ds} = -1.5$. De esta forma se concluyó la implementación de un modelo, del cual se verificó su bondad para

representar la altura de ola significativa en la plataforma continental y en la zona exterior e intermedia del estuario, y del cual se verificó que representa adecuadamente el período y la dirección del oleaje en los puntos donde se ubican la boya Waverider de Hidrovía y el ADCP.

En la zona interior del estuario se observó que el modelo subestima la altura de ola significativa. Como en esta zona predomina ampliamente el oleaje local, este problema se lo vincula a la subestimación observada en los vientos de reanálisis para dicha zona del estuario. Se entiende que dada la angostura de la zona interior del estuario y considerando la resolución espacial de los datos de reanálisis, estos no son capaces de representar adecuadamente un clima de vientos marítimo en dicha zona. Como el potencial undimotriz de dicha zona es bajo, se postergó la mejora del modelo en pos de enfocarse en la buena representación del oleaje en la parte media y exterior del estuario y fundamentalmente en la plataforma continental, zonas de mayor potencial undimotriz y por lo tanto de mayor interés para el estudio.

Con el modelo implementado se realizaron simulaciones de los años comprendidos en el período 1980-2010. Las salidas del modelo se obtuvieron cada tres horas y consisten en campos de altura de ola significativa, período medio, dirección media, dispersión angular respecto a la dirección media, período pico, dirección pico y potencia del oleaje, así como los espectros completos en diecisiete boyas virtuales distribuidas a lo largo de la costa atlántica en profundidades que se encuentran en el entorno de los 20 metros y tres boyas virtuales distribuidas en el estuario. Estos resultados permitieron realizar una caracterización exhaustiva del recurso undimotriz pero también son relevantes por su disponibilidad para ser utilizados en estudios de otra índole que requieran información sobre el oleaje.

En lo que respecta a la magnitud del potencial undimotriz de Uruguay, se obtuvo que la potencia promedio en la zona media e interior del estuario es un orden menor que la obtenida en la plataforma continental. En esta última, a profundidades en el entorno de 20 metros, se obtuvieron valores de potencia media que varían entre 8.5 y 9.3 kW/m en el tramo Punta del Este - La Paloma y entre 10.4 y 13.8 kW/m en el tramo La Paloma - Chuy, identificándose el mayor potencial en el tramo Cabo Polonio - Punta del Diablo. Si se integran estos resultados a lo largo de los 200 km de costa atlántica, se obtiene una potencia media de 2.2 GW. Esto se traduce en que, a profundidades en el entorno de los 20 metros y a lo largo de los 200 km de costa atlántica, la energía media anual del oleaje es de 19.3 TWh. Este valor duplica el actual consumo anual de energía eléctrica del país y constituye una cota superior que sirve como referencia. Este potencial es mayor al alejarse de la costa, en este sentido se obtuvo una potencia media de 20 kW/m a 70 km de la costa y una potencia media de 30 kW/m en el talud continental a 200 km de la costa.

En cuanto a las características del potencial, se obtuvo que el oleaje que contribuye mayoritariamente al mismo se caracteriza por presentar alturas de ola significativa entre 0.5 y 2 metros, períodos pico entre 6 y 12 segundos y provenir del cuadrante E-S. En cuanto a la variación estacional, se observó que la potencia media del oleaje de otoño e invierno es levemente superior a la del oleaje de primavera y verano, así como también se observaron variaciones en lo que respecta a la distribución direccional de la energía. En las estaciones de primavera y verano el oleaje del este tiene un mayor peso relativo en la distribución direccional de la energía que en las estaciones de otoño e invierno donde el oleaje del sureste

adquiere un mayor peso. Por otra parte, en cuanto a la variación interanual del recurso, se destaca que la misma es poco significativa, siendo la desviación estándar de la potencia media anual menor al 10% de su valor promedio.

De esta forma, a partir de analizar toda la información disponible para la zona de estudio en lo que refiera a mediciones directas de oleaje y viento sobre el mar, así como de considerar los datos de viento en superficie del reanálisis NCEP-CFSR y los datos de oleaje altimétricos del proyecto Globwave, se implementó un modelo de generación y propagación del oleaje que permitió obtener los estados de mar en la plataforma continental uruguaya y el estuario del Río de la Plata con una resolución espacial de 1.5 km y temporal de 3 hrs correspondientes al período 1980-2010. A partir de estos resultados se estimó el potencial undimotriz de Uruguay. Tanto las limitaciones tecnológicas así como los conflictos de uso de la zona costera hacen que solo sea posible aprovechar un porcentaje de este potencial. Estimar este porcentaje requiere de otros estudios que consideren los aspectos tecnológicos de los dispositivos de conversión así como los aspectos económicos y ambientales de este tipo de emprendimientos. De todas formas, aunque se obtenga que dicho porcentaje sea bajo, la magnitud del potencial obtenido permite vislumbrar que la energía undimotriz es una alternativa capaz de realizar un aporte no menor a una matriz energética nacional sostenible.

La estimación del potencial del recurso constituye un paso inicial. En la medida que el país procure continuar con el desarrollo de la energía undimotriz, además de continuar mejorando el conocimiento que se tiene del oleaje y mejorando las capacidades para modelarlo, se deberán impulsar nuevas líneas de trabajo en lo que refiere a la investigación y desarrollo de dispositivos de conversión, así como la realización de estudios que se enfoquen en los aspectos económicos y ambientales de este tipo de emprendimientos. Mientras que en lo que respecta al estudio del oleaje en el Río de la Plata y la plataforma continental, las líneas de trabajo futuras pasan por: mejorar los resultados en la zona interior del estuario, obtener resultados con mejor resolución en las cercanías de la costa, determinar el clima de oleaje extremal y el desarrollo de un modelo operacional. Estos desafíos requerirán trabajar en la interacción del modelo implementado con otros modelos, tanto de oleaje como hidrodinámicos y atmosféricos, así como el estudio de procesos físicos relevantes en la transformación del oleaje en ambientes estuarinos y en la generación y análisis de nueva información.

La interacción con un modelo más adecuado para representar el oleaje en zonas costeras permitirá obtener resultados con mejor resolución en las proximidades de la costa. En este sentido se plantea la interacción con el modelo SWAN (Booij et.al., 1999). Como proceso físico a estudiar, se identifica la atenuación del oleaje al propagarse en un lecho de barro. Se entiende que una mejor comprensión de dicho proceso permitiría mejorar los resultados en la zona interior y media del estuario. En esta zona, también es relevante la interacción con un modelo hidrodinámico, ya que las corrientes así como las variaciones de nivel en un ambiente de poca profundidad tienen una incidencia significativa en la propagación del oleaje. La interacción con un modelo atmosférico se plantea en pos de mejorar la resolución de los campos de viento que se utilizan como datos de entrada. El *downscaling* de los datos de viento es necesario para mejorar los resultados en la zona interior del estuario, donde se identificó que los datos de reanálisis subestiman la intensidad del viento, así como para simular eventos extremos considerando escalas espaciales y temporales acordes a los fenómenos

meteorológicos involucrados. Por otra parte en lo que refiere a incorporar y generar nueva información, se plantea el análisis y procesamiento de datos satelitales obtenidos mediante la técnica conocida como radar de apertura sintética (SAR) y la exploración de nuevas técnicas de medición como por ejemplo la posibilidad de medir oleaje en base a video.

Referencias Bibliográficas

- Allender, J., Audunson, T., Barstow, S.F., Bjerken, S., Krogstad, H.E., Steinbakke, P., Vartdal, L., Borgman, L.E., Graham, C., 1989. *The wadic project: A comprehensive field evaluation of directional wave instrumentation*. Ocean Engineering 16, 505–536.
- Anschütz, G., Escalante, R.S., 1998. *Measurements of wave action in the oceanic limit of Río de la Plata estuary*, in: Marine Meteorology and Related Oceanographic Activities: Provision and Engineering/operational Application of Ocean Wave Data. Presented at the Marine meteorology and related oceanographic activities: provision and engineering/operational application of ocean wave data, World Meteorological Organization: Geneva., Paris, pp. 107–116.
- Ardhuin, F. and A. D. Jenkins, 2006: *On the interaction of surface waves and upper ocean turbulence*. Journal of Physical Oceanography, 36(3), 551-557.
- Ardhuin, F. and R. Magne, 2007: *Current effects on scattering of surface gravity waves by bottom topography*. Journal of Fluid Mechanics., 576, 235-264.
- Ardhuin, F., B. Chapron and F. Collard, 2008: *Ocean swell evolution from distant storms*. Nature Geoscience.
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A.V., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., van der Westhuysen, A., Queffeulou, P., Lefevre, J.-M., Aouf, L., Collard, F., 2010. *Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation*. Journal of Physical Oceanography 40, 1917–1941.
- Arinaga, R.A., Cheung, K.F., 2012. *Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data*. Renewable Energy 39, 49–64.
- Battjes, J.A. y. Janssen, J.P.F.M., 1978. *Energy loss and setup due to breaking of random wave*. Proc. 16th Int. Conf. Coastal Engineering, Hamburg. pp.569-587.
- Battjes, J.A., Stive, M.J.F., 1985. *Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves*. Journal of Geophysical Research. 90, 9159–9167.
- Bidlot, J. R., S. Abdalla and P. A. E. M. Janssen, 2005: *A revised formulation for ocean wave dissipation in CY25R1*. Tech. Rep. Memorandum R60.9/JB/0516, Research Department, ECMWF, Reading, U. K.
- Bretherton, F.P., Garrett, C.J.R., 1968. *Wavetrains in Inhomogeneous Moving Media*. Proc. R. Soc. Lond. A 302, 529–554.
- Breugem, W.A., Holthuijsen, L.H., 2007. *Generalized Shallow Water Wave Growth from Lake George*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 133, 173–182.
- Booij, N., Holthuijsen, L. H 1987: *Propagation of ocean waves in discrete spectral wave models*. Journal of Computational. Physics. 68, 307-326.
- Booij, N., Holthuijsen, L.H., 1999. *A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation*. Journal of Geophysical Research. 104, 7649–7666.
- Bouws, E., Günther, H., Rosenthal, W., Vincent, C.L., 1985. *Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form*. Journal of Geophysical Research. 90, 975–986.
- Cahyono, 1994: *Three-dimensional numerical modelling of sediment transport processes in non-stratified estuarine and coastal waters*. Ph.D. Thesis, University of Bradford, 315 pp.
- Cavaleri, L., Alves, J.-H.G.M., Ardhuin, F., Babanin, A., Banner, M., Belibassakis, K.,

- Benoit, M., Donelan, M., Groeneweg, J., Herbers, T.H.C., Hwang, P., Janssen, P.A.E.M., Janssen, T., Lavrenov, I.V., Magne, R., Monbaliu, J., Onorato, M., Polnikov, V., Resio, D., Rogers, W.E., Sheremet, A., McKee Smith, J., Tolman, H.L., van Vledder, G., Wolf, J., Young, I., 2007. *Wave modelling – The state of the art*. Progress In Oceanography 75, 603–674.
- Cavaleri, L. and P. Malanotte-Rizzoli, 1981: *Wind-wave prediction in shallow water: Theory and applications*. Journal of Geophysical Research 86, 10,961–10,973.
- Centre for Renewable Energy Sources, 2006. *Ocean Energy Conversion in Europe. Recent advancements and prospects*.
- Challenor, P., Woolf, D., Gommenginger, C., Srokosz, M., Cotton, D., Carter, D., Sykes, N., 2006. *Satellite Altimetry: A Revolution in Understanding the Wave Climate*. Presented at the 15 Years of Progress in Satellite Altimetry, Venice.
- Challenor, P.G., Srokosz, M.A., 1991. *Wave studies with the radar altimeter*. International Journal of Remote Sensing 12, 1671–1686.
- Chawla, A., Tolman, H.L., 2007. *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (No. Technical Note 254). NOAA / NWS / NCEP / MMAB.
- Chalikov, D. V. and M. Y. Belevich, 1993: *One-dimensional theory of the wave boundary layer*. Bound. Layer Meteor., 63, 65-96.
- Chalikov, D. V., 1995: *The parameterization of the wave boundary layer*. Journal of Physical Oceanography., 25, 1333-1349.
- Chung-Chu Teng, 2008. *Field Measurement*, in: Oceanography, Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO.
- Collins, J. I. 1972. *Prediction of Shallow-Water Wave Spectra*. Journal of Geophysical Research, 77, pp 2693-2707
- Crabb, J.A., Britain, I. of O.S. Great, 1984. *Assessment of wave power available at key United Kingdom sites: a description of work undertaken in the Department of Energy's Wave Energy Programme*. Institute of Oceanographic Sciences.
- Cruz, J., 2008. *Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives*. Springer.
- Davis, R. W. and E. F. More, 1982: *A numerical study of vortex shedding from rectangles*. Journal of Fluid Mechanics, 116, 475-506.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
- Deo M. C. and C. Sridhar Naidu, 1999. *Real time wave forecasting using neural networks*, Ocean Engineering, Elsevier, U.K., 26, 191-203.
- Dragani, W.C., Martin, P.B., Simionato, C.G., Campos, M.I., 2010. *Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32°S and 40°S?* Continental Shelf Research 30, 481–490.
- Ebert, E.E., 2002. *Verifying satellite precipitation estimates for weather and hydrological applications*. Presented at the 1st International Precipitation Working Group, Madrid.
- Eldeberky, Y., 1996. *Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore zone*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, The Netherlands.
- European Thematic Network on Wave Energy, 2002. *Wave energy utilization in Europe. Current status and perspectives*.
- Falcão, A.F. de O., 2010. *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 899–918.
- Falconer, R. A. and Cayhono, 1993: *Water quality modelling in well mixed estuaries using higher order accurate differencing schemes*. in S. S. Y. Wang, editor, Advances in Hydro- Science and Engineering, pp. 81-92. CCHE, University of

- Mississippi.
- Folley, M., Whittaker, T.J.T., 2009. *Analysis of the nearshore wave energy resource*. Renewable Energy 34, 1709–1715.
- Fu, L.-L., Glazman, R., 1991. *The effect of the degree of wave development on the sea state bias in radar altimetry measurement*. Journal of Geophysical Research 96, 829–834.
- Gelci R, Devillaz E, 1970. *Digital computation of the state of sea, Le calcul numerique de l'etat de la mer* 25, 117–136.
- G.I.O.C., U.C., 2000. *Dinámicas, Documentos de referencia SMC*.
- Gommenginger, C.P., Srokosz, M.A., Challenor, P.G., Cotton, P.D., 2003. *Measuring ocean wave period with satellite altimeters: A simple empirical model*. Geophysical Research Letters 30, OCE 2–1 – OCE 2–5.
- Govindan, R., Kumar, R., Basu, S., Sarkar, A., 2011a. *Altimeter-Derived Ocean Wave Period Using Genetic Algorithm*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8, 354 –358.
- Gower, J.F.R., 1976. *GEOS-3 Ocean Wave Measurements in NE Pacific*. Transactions-American Geophysical Union 57, 944–944.
- Group, T.W., 1988. *The WAM Model—A Third Generation Ocean Wave Prediction Model*. Journal of Physical Oceanography 18, 1775–1810.
- Hasselmann, K., 1962. *On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum Part I. General theory*. Journal of Fluid Mechanics 12, 481.
- Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Miller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. 1973. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)* 'Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A(8) (Nr. 12), p.95.
- Hasselmann, S. and K. Hasselmann, 1985: *Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum, Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral*. Journal of Physical. Oceanography, 15, 1369-1377.
- Hayne, G., 1980. *Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation 28, 687 – 692.
- Herterich, K., Hasselmann, K., 1980. *A similarity relation for the nonlinear energy transfer in a finite-depth gravity-wave spectrum*. Journal of Fluid Mechanics 97, 215–224.
- Holthuijsen, L. H., N. Booij, R. C. Ris, I. G. Haagsma, A. T. M. M. Kieftenburg and E. E. Kriezi, 2001: *SWAN Cycle III version 40.11 user manual*. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, P.O. Box 5048, 2600 GA Delft, The Netherlands, see <http://swan.ct.tudelft.nl>.
- Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J.A., Frigaard, P., 2009. *Wave energy potential in Galicia (NW Spain)*. Renewable Energy 34, 2323–2333.
- IH Cantabria, 2010. *Estado del arte de la energía undimotriz*.
- Janssen, P. A. E. M., 1989: *Wind-induced stress and the drag of air-flow over sea waves*. Journal of Physical Oceanography, 19, 745-754.
- Janssen, P. A. E. M., 1991: *Quasi-linear theory of wind wave generation applied to*

- wave forecasting*. Journal of Physical Oceanography, 21, 1631-1642.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996. *The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project*. Bulletin of the American Meteorological Society 77, 437–471.
- Kahma, K.K., Calkoen, C.J., 1992. *Reconciling Discrepancies in the Observed Growth of Wind-generated Waves*. Journal of Physical Oceanography 22, 1389–1405.
- Kaminsky, G.M. and Kraus, N.C., 1993. *Evaluation of depth-limited wave breaking criteria*. Proceedings of 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, Waves 93 (ASCE, New York), pp. 180–193.
- Komen, G. J., S. Hasselmann and K. Hasselmann, 1984: *On the existence of a fully developed wind-sea spectrum*. Journal of Physical Oceanography, 14, 1271-1285.
- Komen, G.J., Cavaleri, L., Donelan, M., Hasselmann, K., Hasselmann, S., Janssen, P.A.E.M., 1996. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press.
- Kreisel, G., 1949. *Surface waves*. Quarterly of Applied. Mathematics, pp. 21-44.
- Krogstad, H.E., F. Barstow, S., 1999. *Satellite wave measurements for coastal engineering applications*. Coastal Engineering 37, 283–307.
- Kuik, A.J., Van Vledder, G.P., Holthuijsen, L.H., 1988. *A method for the routine analysis of pitch and roll buoy wave data*. Journal of Physical Oceanography 18, 1020–1034.
- Lindroth, S., Leijon, M., 2011. *Offshore wave power measurements—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 4274–4285.
- Leonard, B. P., 1979: *A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation*. Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering., 18, 59{98.
- Longuet-Higgins, M.S., 1975. *On the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves*. Journal of Geophysical Research. 80, 2688–2694.
- Madsen, O. S., Y.-K. Poon, and H. C. Graber. 1988. *Spectral wave attenuation by bottom friction: Theory*. Proc. 21st Coastal Engineering Conf., ASCE.
- Mahjoobi, J., Etemad-Shahidi, A., Kazeminezhad, M.H., 2008. *Hindcasting of wave parameters using different soft computing methods*. Applied Ocean Research 30, 28–36.
- Makarynskyy, O., 2004. *Improving wave predictions with artificial neural networks*. Ocean Engineering 31, 709–724.
- Mandal, S., Prabakaran, N., 2006. *Ocean wave forecasting using recurrent neural networks*. Ocean Engineering 33, 1401–1410.
- Mei, C.C., 1989. *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific.
- Minerals Management Service, U.S.D. of the I., 2006. *Technology White Paper on Wave Energy Potential on the U.S. Outer Continental Shelf*.
- Miles, J.W., 1957. *On the generation of surface waves by shear flows*. Journal of Fluid Mechanics 3, 185–204.
- Montoya Ramírez, R.D., Osorio Arias, A.F., 2007. *Los modelos de generación de oleaje de viento: características, evolución y futuras aplicaciones en Colombia*. [WWW Document]. Avances en Recursos Hidráulicos. URL <http://www.bdigital.unal.edu.co/4750/>
- Mosquera, R., Pedocchi, F., Bellón, D., Piedra-Cueva, I., 2012. *Medición del oleaje con un ADCP frente a la costa de Montevideo, Uruguay*. Presented at the XXV

- Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica.
- Munk, W.H., 1950. *Origin and generation of waves*. Int. Conf. Coastal. Eng. 1, 1.
- Özger, M., Şen, Z., 2007. *Prediction of wave parameters by using fuzzy logic approach*. Ocean Engineering 34, 460–469.
- Phillips, O.M., 1957. *On the generation of waves by turbulent wind*. Journal of Fluid Mechanics 2, 417–445.
- Piedra-Cueva, I., Bellón, D., Pedocchi, F., 2011. *Informe de actualización. Convenio UdelaR - IM Estudio técnico de la alternativa de descarga en Punta Lobos de las unidades funcionales Pantanoso, Miguelete y Cerro-Casabó del sistema de saneamiento de Montevideo*.
- Pierson, W.J., Neumann, G., James, R.W., 1955. *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics* (No. Publication N° 603). US Navy Hydrographic Office.
- Pierson, W.J., Moskowitz, L., 1964. *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii*. Journal of Geophysical. Research. 69, 5181–5190.
- Puertos del Estado, España. 1995. *ROM 0.4-95 Recomendación de Obras Marítimas con Acciones climáticas II: Viento*.
- Resio, D. T. and W. Perrie, 1991: *A numerical study of nonlinear energy fluxes due to wave-wave interactions. Part I: Methodology and basic results*. Journal of Fluid Mechanics, 223, 609–629.
- Rice, S.O., 1944. *Mathematical analysis of random noise*. Bell System Technology Journal, 282-332.
- Rosmorduc, V., Benveniste, J., Bronner, E., Dinardo, S., Lauret, O., Maheu, C., Milagro, M., Picot, N., 2011. *Radar Altimetry Tutorial*, J. Benveniste and N. Picot. ed.
- Rusu, E., Guedes Soares, C., 2009. *Numerical modelling to estimate the spatial distribution of the wave energy in the Portuguese nearshore*. Renewable Energy 34, 1501–1516.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., et al., 2010. *The NCEP Climate Forecast System Reanalysis*. Bulletin of the American Meteorological Society 91, 1015–1057.
- Saket, A., Etemad-Shahidi, A., 2012. *Wave energy potential along the northern coasts of the Gulf of Oman, Iran*. Renewable Energy 40, 90–97.
- Salter, S.H., 1974. *Wave power*. , Published online: 21 June 1974; | doi:10.1038/249720a0 249, 720–724.
- SatOC, CLS, 2010a. Globwave. Deliverable D.16. *Satellite Wave Data Quality Report*.
- SatOC, CLS, 2010b. Globwave. Deliverable D.5. *Product User Guide*.
- SatOC, CLS, 2011. Globwave. Deliverable D.9. *Wave Data Handbook*.
- Snyder, R. L., F. W. Dobson, J. A. Elliott and R. B. Long, 1981: *Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves*. Journal of Fluid Mechanics, 102, 1-59.
- Stopa, J.E., Cheung, K.F., Chen, Y.-L., 2011. *Assessment of wave energy resources in Hawaii*. Renewable Energy 36, 554–567.
- Sverdrup, H.V., Munk W.H., 1946. *Empirical and theoretical relations between wind, sea and swell*. Transactions- American Geophysical Union 27, 823–827.
- Teixeira, M. A. C. and S. E. Belcher, 2002: *On the distortion of turbulence by a progressive surface wave*. Journal of Fluid Mechanics, 458, 229-267.
- Thorpe, T.W., 1999. *A Brief Review of Wave Energy*.
- Tolman, H. L., 1991: *A third-generation model for wind waves on slowly varying,*

- unsteady and inhomogeneous depths and currents*. Journal of Physical Oceanography, 21, 782-797.
- Tolman, H. L., 1995: *On the selection of propagation schemes for a spectral wind wave model*. Office Note 411, NWS/NCEP, 30 pp + figures.
- Tolman, H. L. , Chalikov D. V., 1996: *Source terms in a third-generation wind-wave model*. Journal of Physical. Oceanography., 26, 2497-2518.
- Tolman, H. L., 1997: *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15*. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.
- Tolman, H. L., 1999a: *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- Tolman, H. L., 2002: *Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models*. Ocean Modelling., 4, 269{289.
- Tolman, H.L., 2009. *User manual and system documentation of WAVEWATCH IIITM version 3.14* (No. Technical Note 276). NOAA / NWS / NCEP / MMAB.
- Tracy, B. and D. T. Resio, 1982: *Theory and calculation of the nonlinear energy transfer between sea waves in deep water*. WES Report 11, US Army Corps of Engineers.
- Tucker, M.J., 1991. *Waves in ocean engineering: measurement, analysis, interpretation*. E. Horwood.
- U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 2006. *2-minute Gridded Global Relief Data (ETOPO2v2)*.
- Wang, C., Wang, Z., Jin, J. y Peng, Q., 2003. *Realtime Simulation of Ocean Wave Based on Cellular Automata*. CAD/Graphics 2003.
- WAMDI Group: S. Hasselmann, K. Hasselmann, E. Bauer, P.A.E.M. Janssen, G.L. Komen, L. Bertotti, P. Lionello, A. Guillaume, V.J. Cardone, J.A. Greenwood, M. Reistad, L. Zambresky and J.A. Ewing, 1988. *The WAM model –a third generation ocean prediction model*. Journal of Physical. Oceanography. 18, 1775-1810.
- Weber, N., 1991. *Bottom friction for wind sea and swell in extreme depth-limited situations*. Journal of Physical Oceanography 21, 149–172.
- Webb, D. J., 1978: *Non-linear transfers between sea waves*. Deep-Sea Res.,25, 279-298.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., 1996. *A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database*. Journal of Geophysical Research. 101, 8741–8743.
- Wilks, D.S., 2011. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Yaakob, O., Zainudin, N., Samian, Y., Maimun, A., Malik, A., Palaraman, R.A., 2010. *Presentation and validation of remote sensing ocean wave data*. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences 4.
- Young, I.R., Verhagen, L.A., 1996a. *The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 1. Total energy and peak frequency*. Coastal Engineering 29, 47–78.
- Young, I.R., Verhagen, L.A., 1996b. *The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 2. Spectral evolution*. Coastal Engineering 29, 79–99.
- Young, I.R., Verhagen, L.A., Khatri, S.K., 1996. *The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 3. Directional spectra*. Coastal Engineering 29, 101–121.

Descargar anexos del siguiente link:

http://www.fing.edu.uy/~ralonso/Anexos_tesis.pdf