

CARACTERIZACIÓN DEL OLAJE EN LA COSTA CATALANA DATOS PARA VALIDACIÓN

4.1 Introducción

Para implementar de una manera óptima los modelos de predicción de oleaje, incluyendo la física particular de la zona en la que son utilizados, es necesario realizar un análisis de los eventos observados. El análisis debe incluir mediciones de oleaje, viento y batimetría.

A continuación se presenta una descripción de las redes de instrumentación meteorológica y oceanográfica existentes en la costa catalana así como los métodos de muestreo y el tratamiento de datos. Después se describirá un conjunto de tormentas características: Levante (21/10/00 – 25/10/00), Garbí (11/10/00), Mestral (4/6/00 – 12/6/00). Así mismo se incluye la tormenta de Octubre 1997 (Levante 20/10/97 – 31/10/97) y finalmente una descripción más detallada de dos tormentas intensas que se registraron durante Noviembre 2001 y Marzo-Abril 2002. La selección de las tormentas se ha realizado teniendo en cuenta la altura significativa alcanzada, la duración, la dirección predominante y la presencia de datos.

4.2 Redes de instrumentación meteorológica y oceanográfica. Procesamiento de datos

Sensores de oleaje

Los sensores de oleaje podrían clasificarse en sensores direccionales o escalares. Existen varios mecanismos instrumentales para mediciones in situ de las propiedades direccionales del campo de olas. La información espectral puede ser proporcionada desde boyas, sensores remotos, radares instalados en plataformas (tanto en el mar como en la costa), radares náuticos en barcos o radares en aviones. Está claro que en los últimos años se han efectuado avances significantes en la tecnología de los instrumentos. Esto ha hecho posible extender el uso de la información direccional en un rango más amplio de aplicaciones de lo que había sido utilizado en el pasado. Sin embargo, el número de instrumentos desplegados sobre los mares y océanos que proporcionen rutinariamente información direccional, son menores que el número de instrumentos no direccionales. Esto es debido principalmente a tres factores:

- 1.- Los instrumentos direccionales son más caros que los no direccionales.
- 2.- El análisis para conseguir el espectro direccional es menos robusto y todavía hay una cierta controversia en la comunidad científica sobre los métodos de cálculo.
- 3.- No hay evidencia de la consistencia entre instrumentos y métodos, considerando las propiedades direccionales, como por ejemplo forma de la distribución direccional.

Las dificultades inherentes asociadas con la toma de datos y el análisis del espectro direccional no han desaparecido. Las técnicas de medida estándar proporcionan información parcial para el espectro direccional, pero no hacen una sólida estimación del espectro direccional completo. La dirección principal (por intervalos de frecuencia) habitualmente bien definida, tiene una clara interpretación y varios instrumentos concuerdan razonablemente bien. Otros parámetros direccionales, como por ejemplo la propagación o las varias descripciones analíticas del espectro son más ambiguas, y las conclusiones de ellos deberían ser extraídas con precaución. Se puede concluir en este sentido que sin el apropiado conocimiento de las limitaciones de los instrumentos y los métodos, el uso de la información direccional del oleaje en diferentes aplicaciones será más comprometida. Este es el caso cuando los datos direccionales de diferentes fuentes son combinados y comparados.

Con el desarrollo de los satélites y sensores remotos actualmente existen mediciones espaciales de oleaje que permiten definir el campo de oleaje para zonas extensas. Estas mediciones, serán definitivamente una herramienta fundamental en el monitoreo y predicción, no sólo de oleaje sino también de todo el sistema océano - atmósfera. Sin embargo, estos datos dependerán mucho de la resolución, de la proximidad a la costa y de la órbita del satélite.

Red de Boyas – XIOM

La red XIOM (Xarxa d'Instrumentació Oceanogràfica i Meteorològica) se creó en 1984 con la finalidad de obtener medidas para un mejor seguimiento de la evolución de las playas del litoral catalán. A partir de esa fecha, la XIOM ha ido creciendo y aumentando la cantidad de instrumentos colocados. Para el desarrollo de este trabajo nos enfocaremos a los datos provenientes de 4 boyas de oleaje posicionadas a lo largo de la costa catalana.

La boya de Tortosa (por su posición) es una boya direccional fabricada por Datawell, con un sensor tipo “*heave-pitch-roll*” y acelerómetros para registrar movimientos horizontales. Está localizada a 60 m de profundidad y aproximadamente 8 km de la línea de costa. Los datos son tomados con una frecuencia de 1.28 Hz y cada espectro es calculado con una serie de tiempo de 20 minutos. Los espectros direccionales son calculados usando el método de máxima entropía (MEM).

Las boyas de Blanes, Llobregat y Rosas son boyas escalares por lo que no proporcionan ninguna información direccional. La figura 4.1 y las tablas 4.1-4.3 muestran la ubicación y las principales características de las boyas.

Red de estaciones meteorológicas -XMET

La XMET es una red de estaciones meteorológicas automáticas distribuidas por Cataluña que se conectan con un centro de control en el Servei Meteorològic de Catalunya. La red es capaz de dar datos meteorológicos en tiempo real, y se compone de 58 estaciones donde se miden la velocidad y dirección del viento a 10 m de altura, la temperatura y humedad relativa, la radiación solar, precipitación y presión atmosférica. Para los objetivos de este trabajo se han utilizado datos de las estaciones meteorológicas costeras cercanas a las boyas (Fig. 4.1).

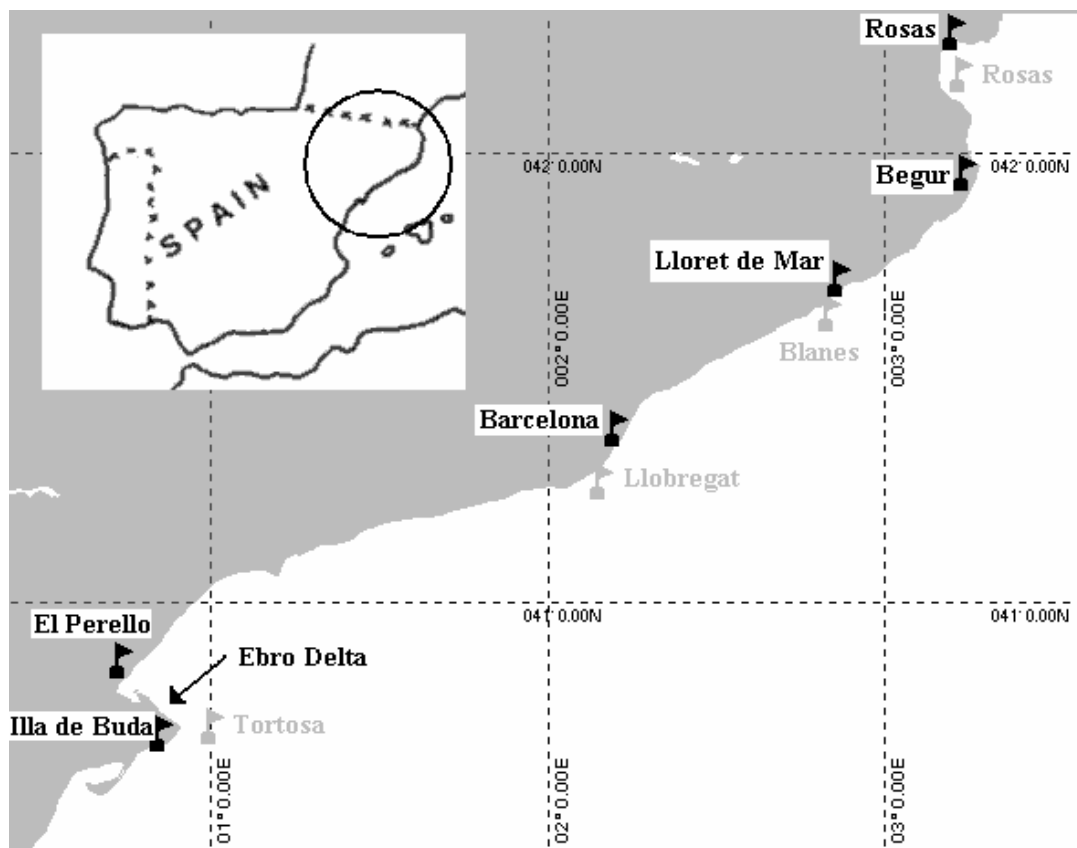


Figura 4.1. Boyas (banderas grises) y estaciones meteorológicas (banderas negras) en la costa catalana.

Boya	Posición	Profundidad (m)	Instrumento
Tortosa	40.72 N, 0.98 E	60	Datawell directional waverider
Blanes	41.65N, 2.82 E	74	Scalar datawell buoy
Llobregat	41.28N, 2.14E	45	Scalar datawell buoy
Rosas	42.18N, 3.2E	46	Scalar datawell buoy

Tabla 4.1. Características de las boyas.

BOYA	Nor. (km)	Tim	SUR (km)	Tim	ESTE (km)	Tim	OESTE (Km)	Tim	S-ESTE (km)	Tim	S-OESTE (km)	Tim
Blanes	5	1.5	190	14	640	26	27	4.5	730	27	495	23
Llobregat	29	5	545	24	690	27	27	4.5	550	24	365	20
Rosas	7	2	273	17	590	25	7	2	728	27	28	4.5
Tortosa	27	4.5	495	23	825	30	8	2	275	17	230	15
Promedio		3.7		20		28		4.1		24		15.3

Tabla 4.2. *Fetch* y tiempo máximo requerido con viento de 5 m/s para alcanzar oleaje completamente desarrollado.

BOYA	Nor. (km)	Tim	SUR (km)	Tim	ESTE (km)	Tim	OESTE (km)	Tim	S-ESTE (km)	Tim	S-OESTE (km)	Tim
Blanes	5	1	190	11	640	25	27	3	730	27	495	20
Llobregat	29	3	545	23	690	26	27	3	550	23	365	16
Rosas	7	1.25	273	14	590	24	7	1.25	728	27	28	3
Tortosa	27	3	495	20	825	29	8	1.5	275	14	230	12
Promedio		2.35		17.6		27		2.7		23		12.2
Hs Teorico		1.3		6		9		1.5		7.5		4.5

Tabla 4.3. *Fetch* y tiempos mínimos para alcanzar oleaje completamente desarrollado con viento de 20 m/s (Todo es *Fetch Limited*).

Las tablas 4.2 y 4.3 dan información sobre las características del oleaje esperados de acuerdo a su posición y a las características del dominio mediterráneo. Se aprecia que para vientos de 20 m/s todas las posiciones se encuentran limitadas por *fetch*, y en tormentas de levante, el tiempo mínimo requerido para alcanzar situaciones completamente desarrolladas son de el orden de 1 día, por lo que también deben esperarse situaciones de duración limitada.

Tratamiento de datos

Las boyas de oleaje proporcionan dos tipos de datos: a) datos tratados que son transmitidos inmediatamente y que son calculados espectral y estadísticamente. b) datos crudos que la boya guarda en memoria y son recuperados más tarde in-situ. Los datos tratados contienen información sobre alturas de ola, periodos y dirección predominante (sólo Tortosa), sin embargo no es posible obtener el espectro (direccional o escalar) medido. Es por esta razón que se han utilizado ambos datos. Para analizar las diferencias y sensibilidades de ambos se ha utilizado una tormenta registrada durante noviembre 2001 como caso prueba. Esta tormenta es descrita más detalladamente en la sección 4.4.

Los datos tratados han sido utilizados directamente, pero los datos brutos han sido tratados con el software proporcionado por Datawell para obtener y “manipular” espectros direccionales de la boya de Tortosa llamado *W@ves2I*. Este programa es un software de interfase múltiple (MDI), en el cual los datos del oleaje aparecen como ventanas. Cada formato de datos tiene su propia ventana, en el cual los datos son presentados usando figuras, gráficas y tablas. Cualquiera de ellos se puede hacer visible con el correspondiente panel en la barra de la ventana. Los datos espectrales son desplegados en una ventana, teniendo seis paneles a su vez:

- 1.- Un listado de los datos tomados por la boya en formato de texto ASCII.
- 2.- Una figura del espectro frecuencial, 1D.
- 3.- Una tabla con la información de la boya (parámetros como Periodo medio (T_z), altura significativa (H_s) entre otros.
- 4.- Una figura del espectro dimensional, 2D, sobre plano o superficie en 3D, basados en el Método de la Máxima Entropía (MEM).
- 5.- Una tabla resumen del espectro (con diferentes parámetros).
- 6.- Un ajuste del espectro frecuencial, 1D, a espectros teóricos (Pierson-Moskowitz y Bretschneider).

El método de la máxima entropía (MEM) (*Lygre y Krogstad, 1986*) para calcular espectros direccionales hace una estimación de la distribución direccional de los coeficientes de Fourier a cada frecuencia. Sin embargo, aún existen discusiones sobre los métodos para obtener espectros. *Pettersson et al. (2003)* mostraron que el método para estimar el espectro direccional puede modificar los resultados.

En el trabajo que aquí se presenta todos los espectros direccionales medidos han sido obtenidos con el método de MEM.

Se graficaron los parámetros del archivo de datos tratados de la boya (utilizándolos a cada hora) para el temporal de noviembre. También se graficaron los datos para los parámetros calculados por el programa *W@ves21* cada 3 horas. A continuación se describe el comportamiento de los parámetros y algunas diferencias observadas según los datos utilizados. Aquí se referirá a “datos de la boya” a los datos calculados con el software incluido en la boya, y “datos de *w@ves21*” a los datos calculados con dicho programa.

Altura significativa (H_s)

El programa *w@ves21* muestra estimas mayores a las proporcionadas por el archivo de la boya. Mientras que los datos de la boya estiman H_s de 5.7 m y casi 6 m para el primer y segundo pico de tormenta, el programa *w@ves21* estima 6 m y 7 para dichos picos. Además este programa muestra un incremento después del segundo pico que parece ser un error. La tendencia general de ambos es sin embargo muy parecida.

Altura máxima (Hmax)

Este parámetro sólo es calculado por el programa w@ves21. En la figura 4.2 de Hs y Hmax se observa que es probable que las máximas alturas no se presenten en los momentos de máximas Hs. El programa estima máximos de 10 m para el primer pico de tormenta y de 9.5 m para el segundo.

Densidad espectral pico máxima (Smax)

Este parámetro, al igual que Hmax, sólo es estimado por w@ves21 (Fig. 4.2). Se observa que a pesar de encontrarse mayor Hs en el segundo pico, la energía máxima se presenta en el primer pico. Se observa un crecimiento muy rápido justo en los picos y no siendo así para el comienzo de dichos picos como se muestra con el crecimiento de Hs.

Periodo pico (Tp)

Este parámetro fue estimado por ambos programas mostrando un comportamiento muy similar presentando los mismos máximos, 14 s para el primer pico y 12 para el segundo. El periodo de pico se muestra relativamente homogéneo durante la tormenta ya que no muestra un crecimiento o una disminución clara como en las gráficas de Hs.

Periodo medio de cruce por cero (Mean zero crossing period - Tz)

La gráfica generada con los datos de la boya muestra un máximo más alto que w@ves21. Por otro lado la serie de tiempo del w@ves21 muestra variabilidad “anormal” dentro de los picos, mostrando descensos y ascensos que sólo pueden ser explicados a causa de un mal comportamiento del programa.

Ancho espectral Nu

Este parámetro muestra grandes diferencias entre las dos series de tiempo. El w@ves21 estima máximos de 0.8 para el primer pico y de 0.75 para el segundo mientras que los datos de la boya alcanzan 0.65 para el primer pico y 0.5 para el segundo. El w@ves21 muestra cambios más bruscos y en general valores más altos.

Ancho espectral Épsilon

En este parámetro el w@ves21 no muestra valores tan altos como Nu comparados con los datos de la boya, pero sigue existiendo la presencia de cambios bruscos en los valores. En general, epsilon se comporta de manera más similar que Nu entre los dos métodos.

Ancho espectral Q_p

Este parámetro se comporta de manera similar con ambas series. Sin embargo, quizá por las diferentes frecuencias de los datos de cada una, se muestran tendencias más claras en la gráfica con los datos de la boya. Se observan valores menores para los picos de tormenta.

Dirección del pico y dispersión direccional

Las estimas de la dirección media asociada al pico del espectro son muy similares para ambas series de tiempo, mostrando diferencias atribuidas a la frecuencia de los datos para la gráfica del $w@ves21$.

La dispersión direccional muestra gran variabilidad para ambas series de tiempo resultando difícil encontrar patrones claros. Se observa un aumento de la dispersión al inicio y final de las tormentas. Esto es interesante ya que al final de las tormentas se podría esperar un *swell* predominante con dispersión direccional reducida. Por ejemplo, *Pettersson et al. (2003)* presentan datos de dispersión direccional para el golfo de León, mostrando valores dentro del mismo rango y siendo menores para alturas H_s mayores.

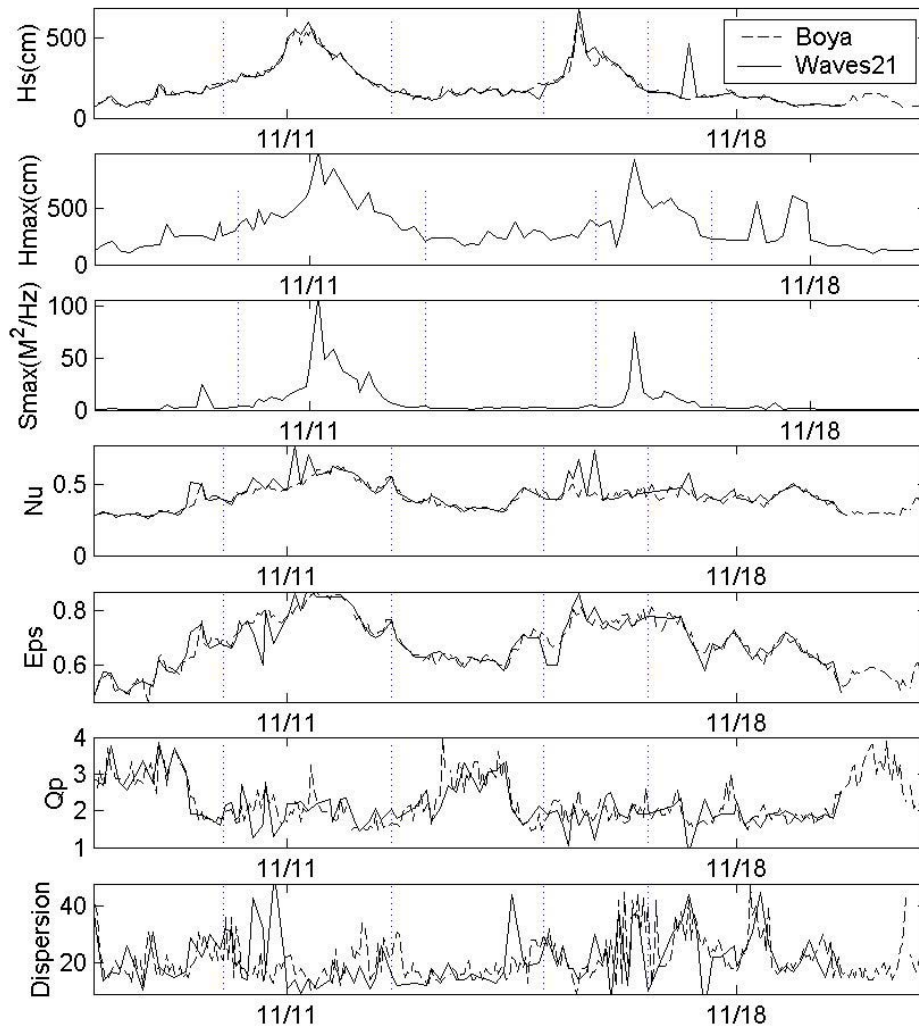


Figura 4.2. Series de tiempo para la tormenta de Noviembre de datos de la boya utilizando dos métodos de tratamiento.

Con la comparación realizada se ha observado que el tratamiento de los datos en la boya utiliza un procedimiento más robusto que la metodología utilizada en el `w@ves21`, el cual mostró un comportamiento más errático y valores irreales. Por esta razón, todos los parámetros excepto los espectros direccionales y aquellos que sólo sean proporcionados por el `w@ves21` serán utilizados de los datos procesados por la boya.

4.3 Descripción de tormentas características registradas por la XIOM

En aproximadamente 10 años de mediciones escalares y direccionales de oleaje se han estudiado diferentes patrones para clasificar las tormentas (magnitudes y direcciones características así como su duración y persistencia). En base a estos estudios se han seleccionado determinadas tormentas para estudiar con más detalle su generación y las implicaciones que podrían tener para la predicción del oleaje. En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran algunos resultados caracterizando el clima de oleaje.

La tabla 4.4 muestra algunos parámetros estadísticos de la boya de Tortosa estimados de la serie de tiempo de 1990 al 2001. La figura 4.3 muestra la duración media de las tormentas donde se aprecia una media sobre las 20 horas siendo las de Mestral las más cortas y las de Levante las más persistentes. La figura 4.4 muestra una sectorización de los datos donde, en porcentaje, se confirma la predominancia del oleaje del este, noroeste y sur para tormentas. Tomando en cuenta las calmas se observa un aumento de oleaje del sureste.

Hmax max	992.00	Tmax max	13.00
Hmax med	134.01	Tmax med	4.90
H1/3 max	596.00	Tmed max	9.10
H1/3 med	77.20	Tmed med	3.98
Hs max	595.00	Tz max	8.70
Hs med	86.60	Tz med	3.78
Tp max	14.30	Tp med	5.31

Tabla 4.4.- Valores característicos del oleaje registrados en Cabo Tortosa desde 1990 hasta 2001. Las alturas se presentan en cm y los periodos en segundos.

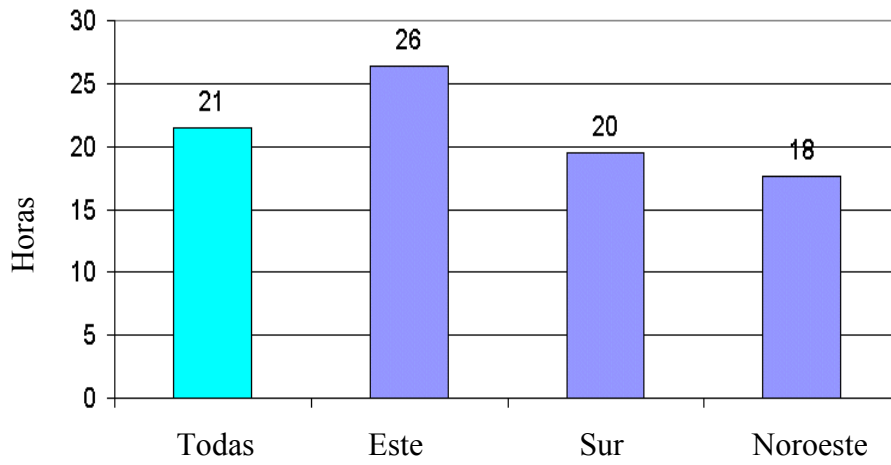


Figura 4.3. Duración media de las tormentas en Tortosa.

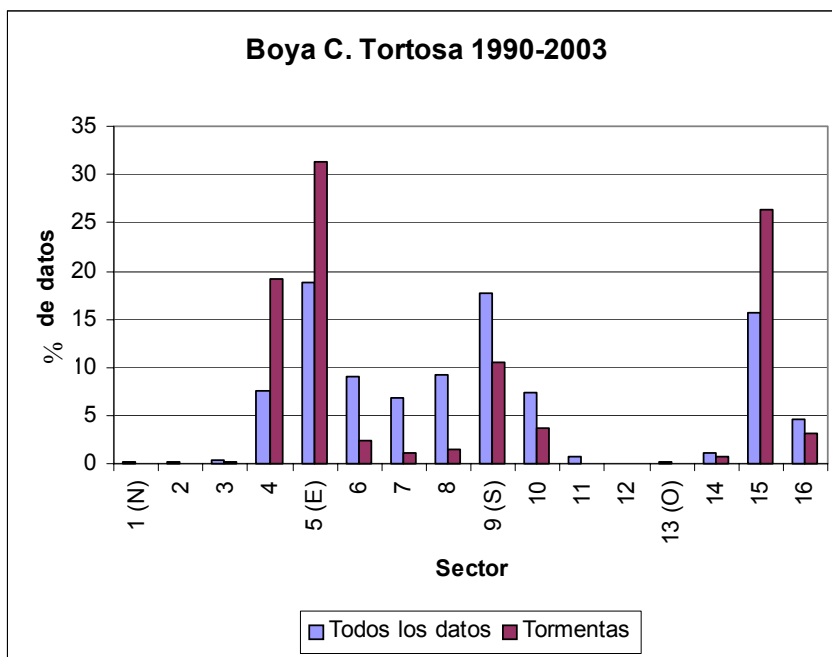


Figura 4.4. Distribución direccional en Tortosa.

Para complementar los estudios previamente realizados, se hizo una estadística de tormentas observadas en la costa catalana con el fin de estudiar su comportamiento en lo que se refiere a su crecimiento y relajación. Se utilizaron observaciones de junio 1990 a febrero 2002 en la localidad de Tortosa. Se separaron las tormentas según su dirección de aproximación, considerándose “evento de tormenta” a los eventos que rebasaron 1.5 m de altura significativa. Se encontraron crecimientos máximos de 1 m/hr para direcciones de Levante y Mestral, con promedios de 0.1 m/hr. La relajación de las tormentas siempre se mostró (al menos estadísticamente) más lenta con máximos de 0.8 m/hr para Levante y promedio de 0.09 m/hr. De estas tormentas es especialmente interesante observar las condiciones de Mestral, donde el *fetch* es aproximadamente de 10 km, ya que son los vientos más predominantes y que suelen producir fuertes vientos con medias de 9.4 m/s y rachas de hasta 40 m/s.

A continuación se describen 4 tormentas que cubren las direcciones predominantes con el fin de comprender la generación y evolución de las tormentas de oleaje en la costa catalana. Los datos utilizados son los provenientes de la boya de Tortosa y la estación meteorológica de la Illa de Buda situada en la zona plana (planicie deltaica) del Delta del Ebro. En secciones posteriores se describirán y se discutirán con más detalle dos tormentas intensas utilizando datos espacialmente más amplios y la predicción realizada.

4.3.1 OCTUBRE 97

Durante el 20 y 31 de octubre de 1997 se presentó una tormenta de oleaje en la costa catalana que alcanzó una altura de ola (Hs) de casi 5 metros y periodos (Tz) de 8 segundos. El pico principal de la tormenta se presentó en los últimos días del mes, donde se alcanzaron velocidades de viento de casi 10 m/s en Illa de Buda.

La carta sinóptica del día 28 12:00 muestra un centro de baja presión sobre el Mediterráneo al este de la costa catalana. Este centro se desplaza al oeste aumentando el gradiente de presión para las 18:00. En el día 29 a las 6:00 el sistema migra al sureste conservando los gradientes que 6 horas más tarde disminuyen apreciablemente y con ello produciendo la reducción del viento.

La relación de la dirección del viento con la dirección del oleaje (Fig. 4.5) no es directa, lo que muestra una fuerte influencia de *swell*. Ambas direcciones muestran gran variabilidad y poca concordancia a excepción del día 24 en el cual ambas direcciones se ubicaron alrededor de los -50° (Mestral). Las direcciones muestran dicha variabilidad teniendo cambios de 180° en un intervalo de tiempo corto.

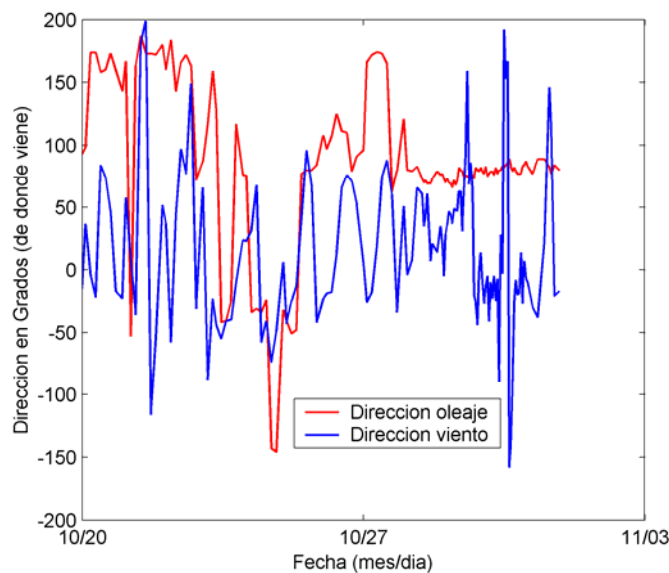


Figura 4.5. Dirección del viento y oleaje 20/10/97.

La altura de ola en Tortosa y la velocidad del viento en Illa de Buda también muestran poca relación (Fig. 4.6). La altura de ola se presenta poco sensible a los cambios de velocidad menores a 6 m/s y el único incremento notorio se da en el pico de la tormenta, donde el viento alcanza los 9 m/s en dos ocasiones durante un periodo de 20 horas. El oleaje incrementa notoriamente de 1.3 m después del primer pico del viento y alcanzando el máximo de casi 5 m, coincidiendo con el segundo pico del viento. Después, el oleaje se reduce de manera constante con el tiempo, alcanzando 1.2 m después de 2 días.

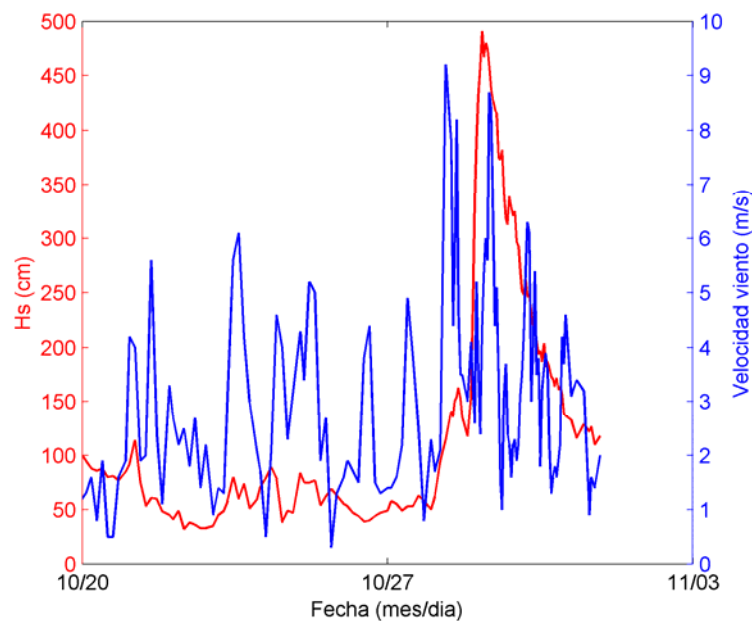


Figura 4.6. Altura de ola (rojo) y velocidad del viento (azul) 20/10/97 al 31/10/97 21 horas.

El periodo medio (T_z) y el de pico (T_p) (Fig. 4.7) se muestran poco sensibles para cambios de viento menores a 6 m/s pero no para el pico de la tormenta, donde el T_p alcanza 14 s. y T_z 8 s. Es interesante observar la menor tasa de disminución de ambos periodos después de la tormenta respecto a el periodo observado antes de la tormenta.

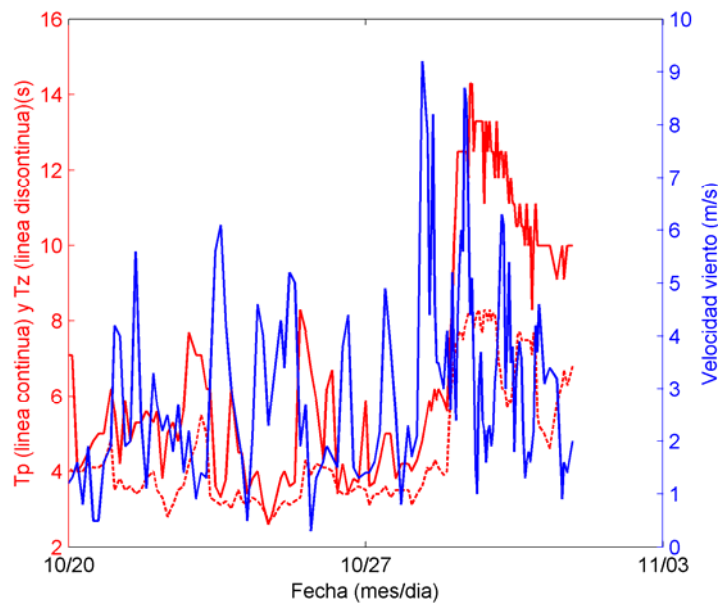


Figura 4.7. Periodo medio, periodo pico y velocidad del viento 20/10/97 al 31/10/97 21 horas.

4.3.2 MESTRAL (4/6/00 – 12/6/00)

En la condición de Mestral, las mediciones de dirección del viento y del oleaje (Fig. 4.8) coinciden considerablemente. El oleaje muestra una reacción directa e inmediata en la mayoría de los cambios de dirección del viento. El viento se inicia alrededor de los 100° (Levante) sufriendo un cambio en las últimas horas del día 4/06/00 en las direcciones entre 300° y 350° (Mestral – Tramontana). Dicho cambio es mostrado por el oleaje horas más tardes pero de menor duración. La dirección del viento regresa a los 100° después de 15 horas. Este comportamiento se repite dos veces más consecutivamente en periodos de 7 horas para direcciones entre 200° y 100° , y 15 horas para 300° . El oleaje sigue de manera inmediata el comportamiento de la dirección del viento en los últimos dos eventos de 300° . En las primeras horas del día 7 la dirección regresa de 300° a ubicarse entre 200° y 100° , siendo variable y llegando incluso hasta los 20° . El oleaje en este periodo se muestra también muy variable con cambios de dirección de hasta 100° en intervalos de 1 hora. Para las últimas horas del día 9 el viento vuelve a la dirección de 300° y así el oleaje muestra en la mayoría de los casos, un desvío direccional de 10° aproximadamente respecto del viento. Es interesante notar un cambio de dirección del oleaje desde los 300° a 120° mientras el viento se conserva en 300° . Dicha variación del oleaje dura aproximadamente 8 horas y se restablece en la dirección de 300° . Las diferencias de las direcciones se mantienen por debajo de los 70° para los eventos de dirección 300° .

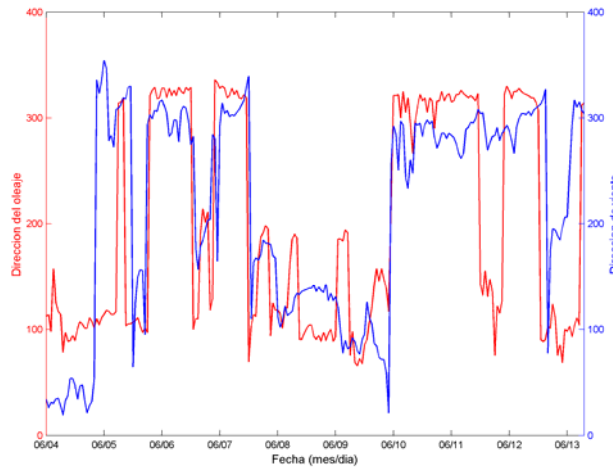


Figura 4.8. Dirección del viento y del oleaje.

En la gráfica de velocidad del viento y altura de ola (Fig. 4.9) se pueden observar dos picos principales en la tormenta. El viento muestra una gran variabilidad aumentando desde prácticamente 0 m/s hasta 9 m/s para el primer pico y disminuyendo a 2 m/s para finales del día 7. La velocidad vuelve a aumentar en el día 8 pero siendo de menor intensidad. La velocidad tiene muchas oscilaciones, y alcanza su máximo valor puntual en las últimas horas del día 10 siendo de 10 m/s y perdiendo su energía en 1.5 días. La altura de ola se muestra menos oscilante y resalta la presencia de los dos picos en la tormenta, el primero con una altura de 1.8 m y el segundo de 2 m. El oleaje se mostró insensible para el ligero aumento del viento entre los dos picos principales de la tormenta. En general la altura registra y sigue el comportamiento del viento.

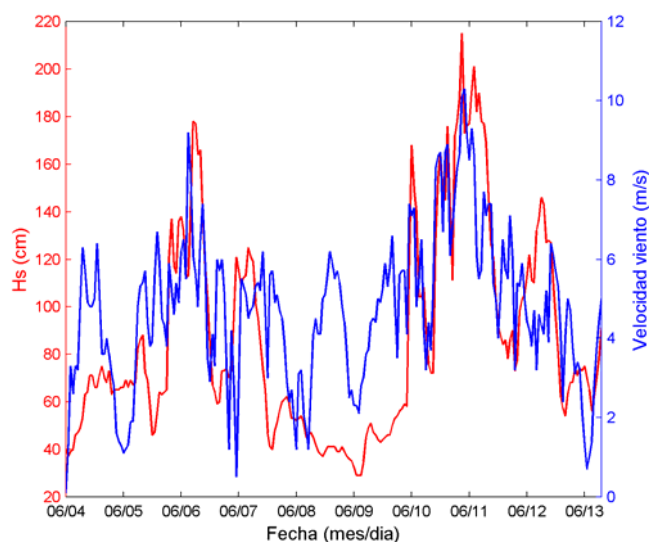


Figura 4.9. Velocidad del viento y altura de ola 4/6/00 al 12/6/00.

El periodo medio (T_z) y periodo pico (T_p) se comportan, en términos generales, de la misma manera que la altura de ola con excepción del intervalo entre los dos picos principales de la tormenta, donde el T_p y T_z sufren un notorio incremento llegando hasta 10 s para el T_p y siendo este el máximo registrado durante el evento.

Las cartas sinópticas muestran el primer pico de la tormenta de una forma menos clara que el segundo. El centro de baja presión se encuentra al Este y las isobaras paralelas a la costa. El gradiente de presión sufre un relajamiento a partir del día 6 a las 12:00 pero se incrementa para generar el segundo pico de la tormenta en el día 10 a las 0:00 donde el centro de baja presión se encuentra en la costa catalana y las isobaras muestran un fuerte gradiente de presión llegando a su máximo a las 12:00 del mismo día (Fig. 4.10 y 4.11).

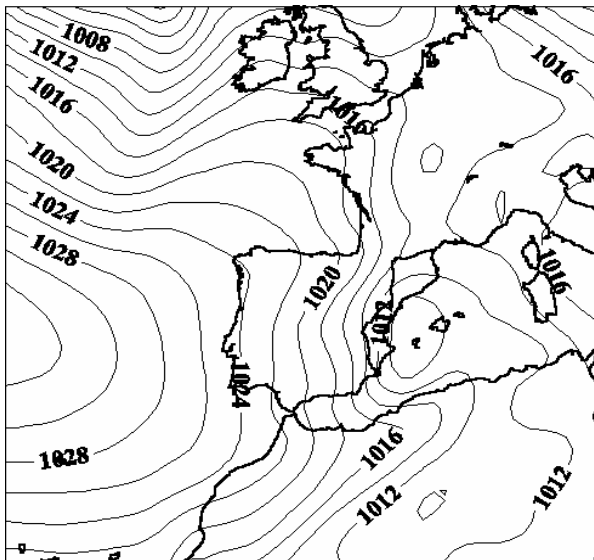


Figura 4.10. Carta sinóptica 10/06/00 0 horas.

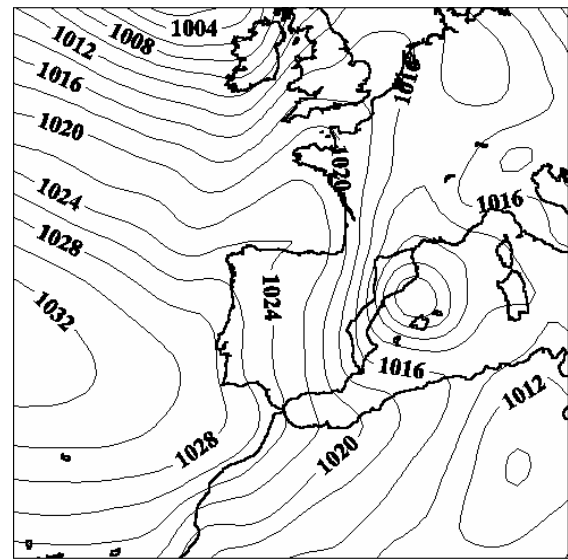


Figura 4.11. Carta sinóptica 10/06/00 12 horas.

4.3.3 LEVANTE (21/10/00 – 25/10/00)

La dirección del oleaje medido en la boya (Fig. 4.12) se observa constante y sin mucha variabilidad, iniciándose el día 21/10/00 en 140° y disminuyendo a 90° (Levante) para las últimas horas del mismo día y permaneciendo relativamente constante hasta el fin de la tormenta (26/10/00). Por el contrario las mediciones de dirección del viento en Illa de Buda muestran una mayor variabilidad iniciándose en 50° y sufriendo variaciones de hasta 140° . A las últimas horas del día 21 se muestra un cambio de la dirección del viento, ubicándose alrededor de 320° y con una duración aproximada de 6 horas. La poca variabilidad de la dirección del oleaje muestra que no hay influencia de la dirección del viento local o que el viento medido en Illa de Buda es exclusivamente local y no es representativo de la zona. Las diferencias entre la dirección del viento y del oleaje son en la mayoría de los casos de más de 40° e incluso de más de 100° , al inicio y al final de la tormenta.

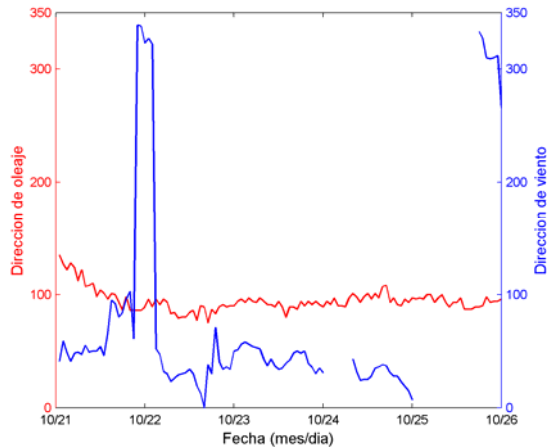


Figura 4.12. Dirección del viento, oleaje y diferencia 21/10/00 al 25/10/00.

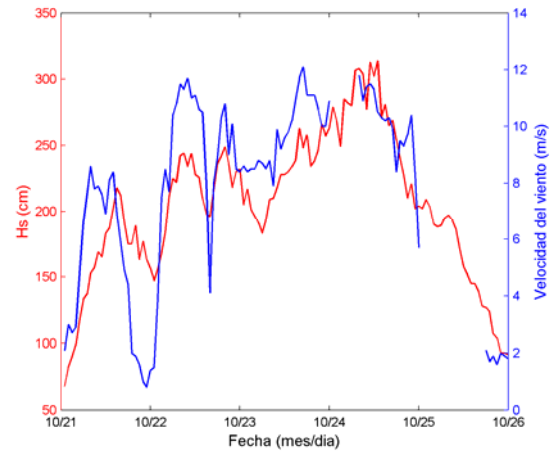


Figura 4.13. Altura de oleaje y velocidad del viento 21/10/00 al 25/10/00.

La velocidad del viento (Fig. 4.13) muestra una mayor similitud con la altura de ola que la relación entre las direcciones, con excepción de la última hora del día 21, que es cuando se presenta fuertes cambios de dirección del viento. La velocidad inicia en 3 m/s incrementando hasta 8 m/s donde las alturas observadas alcanzan 2.2 m. Después disminuye a 1 m/s en las últimas horas del día 21 perceptible en las observaciones de la altura del oleaje, que disminuye a 1.5 m. A partir del día 22, la velocidad incrementa sobrepasando los 10 m/s durante 10 hr también perceptible en la altura de ola siendo de 2.4 m. Después de las 10 hr se observa un descenso en la velocidad siendo de 4 m/s y afectando la altura de ola. Para fuertes cambios de velocidad (5 m/s ya sea disminución o aumento) la altura de ola demorara en mostrar dichos cambios, y sin embargo para cambios menores, el efecto es prácticamente inmediato. La disminución de Hs puede ser producida por disminución del viento, pero para disminuciones de Hs de misma intensidad, el viento muestra altas variaciones. En términos generales se puede observar que el comportamiento de la altura de ola sigue el comportamiento del viento.

Con las observaciones de velocidad del viento y altura del oleaje, se puede decir que en condiciones de Levante las mediciones de velocidad del viento son representativas para la zona y sin embargo, esto no es así para la dirección del viento, que puede verse influenciada por otros factores.

El periodo medio (T_z) durante los días estudiados sigue el mismo comportamiento que la altura de oleaje pero con mayor variabilidad, con periodos dentro de el rango de 4 y 5.5 s. El periodo pico (T_p) muestra aún mayor variabilidad que T_z e incluso no muestra el incremento al

inicio de día 22 como lo hace la altura o Tz. En general la gráfica de Tz hace más notoria la demora o desfase del oleaje en percibir los efectos del viento durante cambios considerables.

En las cartas sinópticas (Fig. 4.14 - 4.15) se observa que al inicio del día 21 se encuentra, a 400 km al sur de Cataluña, un centro de baja presión. A las 12 horas del día 21 se observa un movimiento del centro alejándose la isobara de 1014 mb de la de 1016 mb pero conservándose la distancia entre la de 1016 mb y 1014 mb. En estas condiciones se presentan los vientos de 8 m/s del primer pico de la tormenta. Durante las primeras horas del día 22 se homogenizan las isobaras y se reduce el gradiente de presión en la zona, lo cual coincide con la disminución de la intensidad del viento a finales del 21 e inicios del 22. Conservando el mismo patrón, las isobaras se desplazan al suroeste y disminuyen la distancia entre ellas presentándose el máximo gradiente a inicios del día 24, (Fig. 4.16) donde coincide con las velocidades máximas de los vientos; a partir de esta fecha las isolinneas vuelven a separarse y con ello la velocidad del viento disminuye.

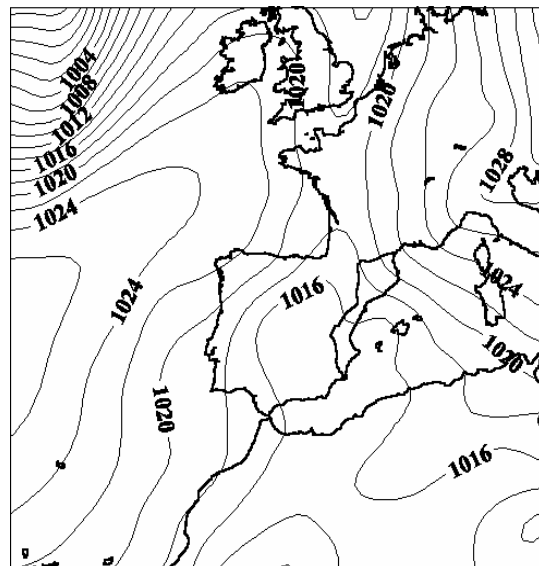
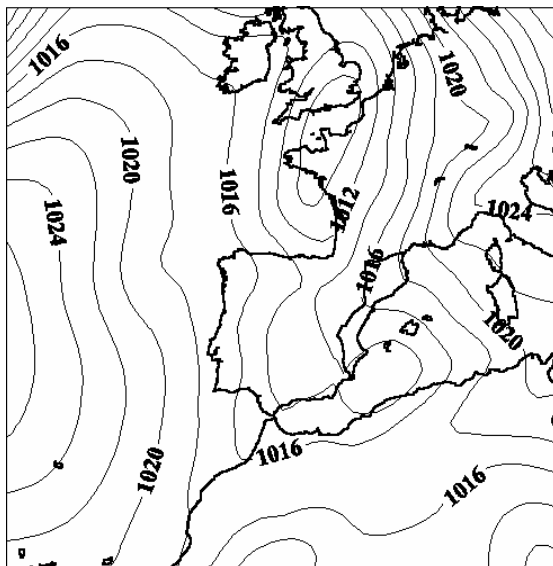


Figura 4.14. Carta sinóptica del día 21/10/00 a las 0 horas. Figura 4.15. Carta sinóptica del día 21/10/00 12 horas.

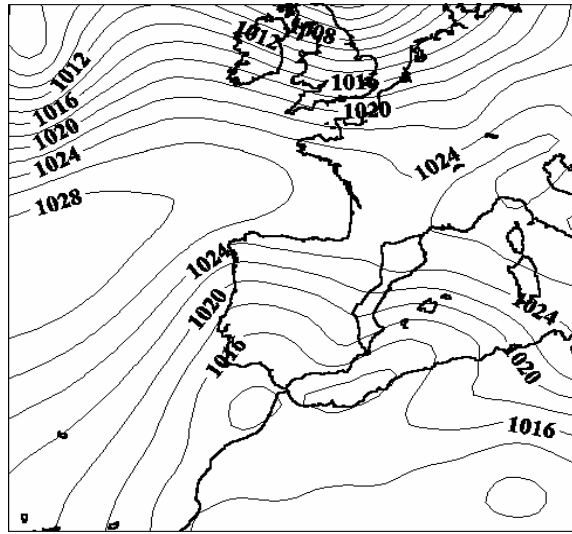


Figura 4.16. Carta sinóptica del día 24//10/00 a las 0 horas.

4.3.4 GARBÍ (11/10/00)

El comportamiento de la dirección del oleaje (Fig. 4.17) es constante durante el periodo de la tormenta 11/10/00, manteniéndose entre 180° y 200° y disminuyendo a 150° para las últimas horas del día. La dirección del viento tiene mucha variabilidad y sólo muestra constancia en el pico de la tormenta durante las 9 y 15 horas. Fuera de ese periodo las direcciones oscilan entre 170° y 360° . Lo anterior se puede observar calculando la diferencia entre las direcciones donde para el periodo del pico de tormenta las diferencias son menores (hay que tomar en cuenta los pocos datos que hay de oleaje) respecto a las diferencias fuera del pico de tormenta donde existen diferencias de hasta 180° . Con estas observaciones se puede decir que para vientos del sur y/o Garbí las mediciones de dirección de Illa de Buda sólo son representativas para condiciones intensas de viento, mientras que con vientos débiles las condiciones de dirección del viento medidas pueden ser exclusivamente locales.

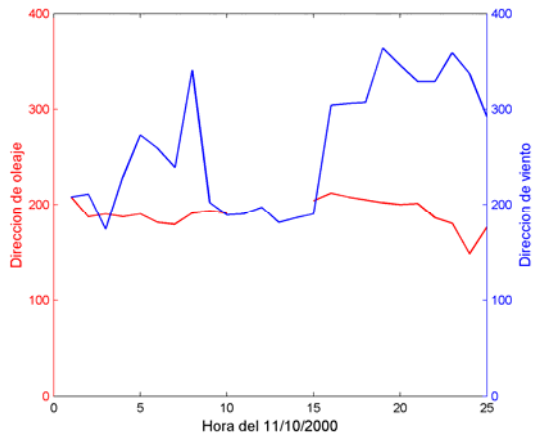


Figura 4.17. Dirección del viento y oleaje medidos.

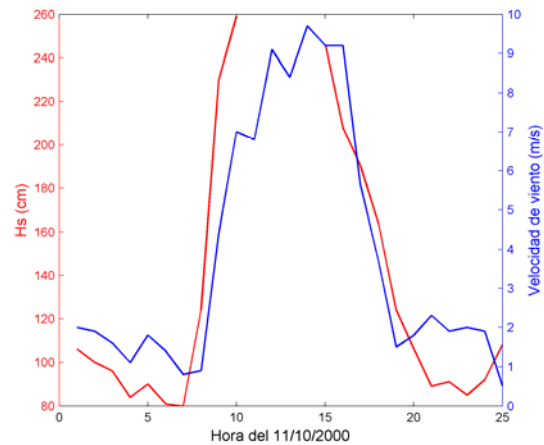


Figura 4.18. Altura de ola y velocidad del viento.

Las medidas de altura de ola y velocidad del viento muestran un claro seguimiento de la altura a la intensidad del viento. Es interesante observar el incremento de la altura de ola a las 7 horas mientras que el incremento del viento inicia a las 8 hr. Otro punto interesante es la disminución del oleaje entre las 15 y las 16 horas mientras el viento se mantiene constante. La tormenta inicia con un viento de 1 m/s y alturas de 80 cm, la tormenta se desarrolla en 8 horas alcanzando velocidades de viento de 9 m/s en Illa de Buda y alturas de ola de 2.5 m en Tortosa.

El periodo medio (T_z) y el periodo pico (T_p) (Fig. 4.19) se comportan de la misma manera que la altura de ola pero teniendo T_z un menor rango (3.5 - 5.5 s) que T_p (4 - 7.5 s). Se observa que el T_z y T_p después de la tormenta se conservan más elevados que antes de la tormenta, a pesar de haber velocidades del viento y altura de olas pequeñas y similares a los encontrados antes y después del pico de la tormenta.

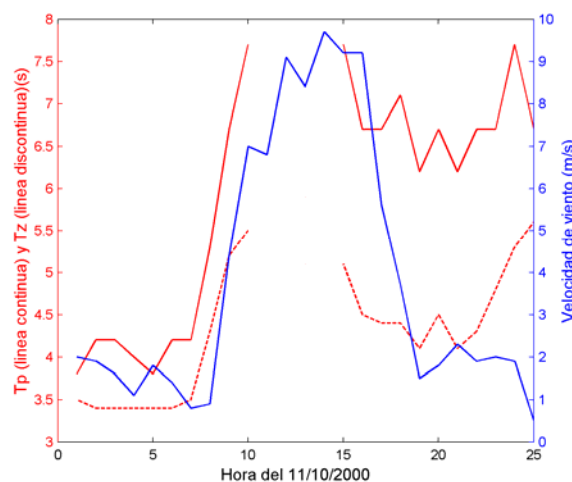


Figura 4.19. Periodo pico, periodo medio y velocidad del viento.

Las cartas sinópticas (Fig. 4.20 y 4.21) muestran para el día 11 a las 0:00 horas un centro de baja presión ubicado al Sureste de Inglaterra el cual controla de una manera homogénea las condiciones en el resto de Europa. Las isobaras son concéntricas, pero en la costa del Mediterráneo sufren una deformación dando esto un menor gradiente de presión. Doce horas más tarde (Fig. 4.21), en el pico de la tormenta, el centro de baja presión se ha desplazado al noreste y con ello ha ido aumentando el gradiente de presión y también el viento geostrófico. A las últimas horas del día el centro de baja presión continúa su migración al norte y aparece una separación de isobaras.

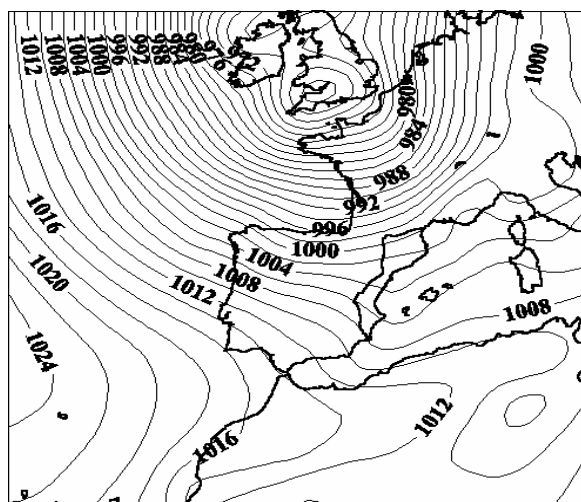


Figura 4.20. Carta sinóptica del día 11/10/00 0 horas.

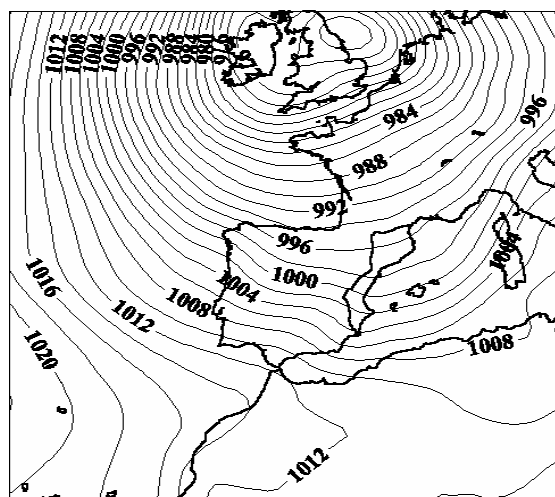


Figura 4.21. Carta sinóptica del día 11/10/00 12 horas.

4.4 Tormenta de Noviembre 2001

En esta sección y en la 4.5 se describen dos eventos que impactaron las costas catalanas en los años 2001 y 2002. Más tarde estas tormentas serán utilizadas como casos de validación de modelos atmosféricos y de predicción de oleaje. Estos episodios serán utilizados para identificar los procesos y escalas relevantes para mejorar la predicción de oleaje y viento en la zona.

4.4.1 Condiciones generales

Entre los días 9 y 16 de noviembre de 2001 se produjo en el Mediterráneo Occidental una situación meteorológica muy compleja, caracterizada fundamentalmente por fuertes vientos y temporal en el mar, pero también por lluvias localmente fuertes y en algunos casos por el episodio de nevadas a cotas bajas.

Tanto la costa mediterránea de la Península Ibérica como las Islas Baleares y el norte de África sufrieron las graves consecuencias de los temporales de viento y lluvia que a lo largo de una semana afectaron estas zonas, especialmente sensibles a los fenómenos meteorológicos adversos, poco frecuentes pero muy intensos y persistentes.

Los vientos fueron especialmente intensos los días 10, 11, 14 y 15 de Noviembre en la costa central catalana, aunque la Tramuntana y el Mestral soplaron ya desde el día 9 y no pararon prácticamente en todo el episodio. Las olas llegaron a superar los 6 metros de altura significativa (según Berghaenel, Grupo de Predicción i Vigilancia del Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (INM)). Concretamente el observatorio del Estartit registró olas con alturas significativas entre los 3 metros y los 5 metros del este y noreste el día 11, siendo el temporal más importante del año y uno de los más importantes de los últimos 5 años en dicho observatorio.

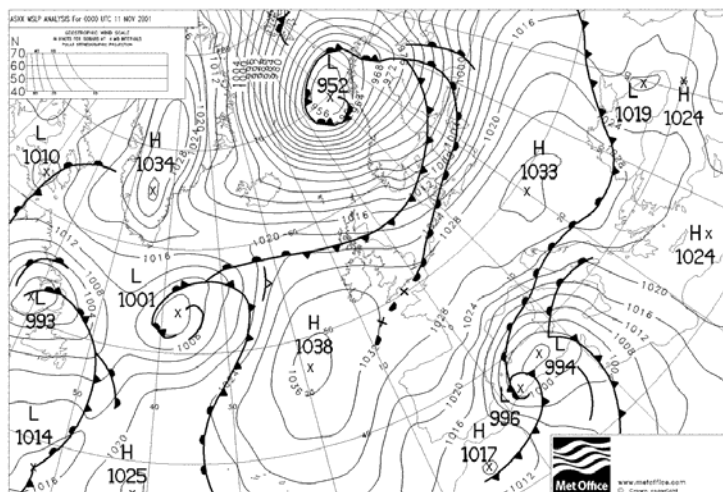


Figura 4.22. Carta sinóptica del día 11/11/01 00 horas.

Durante el 10 de noviembre un sistema de baja presión se ubicó sobre el Mediterráneo y uno de alta presión sobre el Atlántico noroeste. Esto produjo un patrón de isobaras alineadas con la costa catalana. Durante el 11 de noviembre (Fig. 4.22) las isobaras se curvan e incrementa el gradiente de presión, el sistema se relaja el día 12 hasta el 15, cuando otro centro de bajas presiones se produce, y origina el segundo pico de tormenta registrado por las boyas.

Respecto al oleaje, la tormenta se registra a partir del día 9 cuando el oleaje crece a partir del metro de altura aproximadamente, encontrando valores máximos entre las 6 y las 12 horas del día 11 con valores de 5.5 metros en Tortosa (Fig. 4.23). La altura de ola disminuye hasta 1 metro el día 13, pero vuelve a aumentar a partir del día 14 generando una segunda tormenta que alcanza casi los 6 metros en Tortosa a las 12:00 del día 15, tiempo en el que también las otras posiciones alcanzan su máximo. En Tortosa, este segundo pico de tormenta es más intenso y más corto. Sin embargo, en las posiciones de Blanes y Llobregat son muy similares en magnitud y duración con respecto al primer pico.

El periodo medio alcanzó máximos de 9 s en la boya de Blanes y de 8 segundo para el resto de las boyas. Las series de tiempo del periodo se comportaron de manera muy similar a las de altura significativa. La dirección en Tortosa (Fig. 4.23e) muestra direcciones NW en condiciones de calma mientras que señala SE e incluso NE en los picos de tormenta.

Esta tormenta causo daños severos a playas, puertos y estructuras sobre toda la costa catalana.

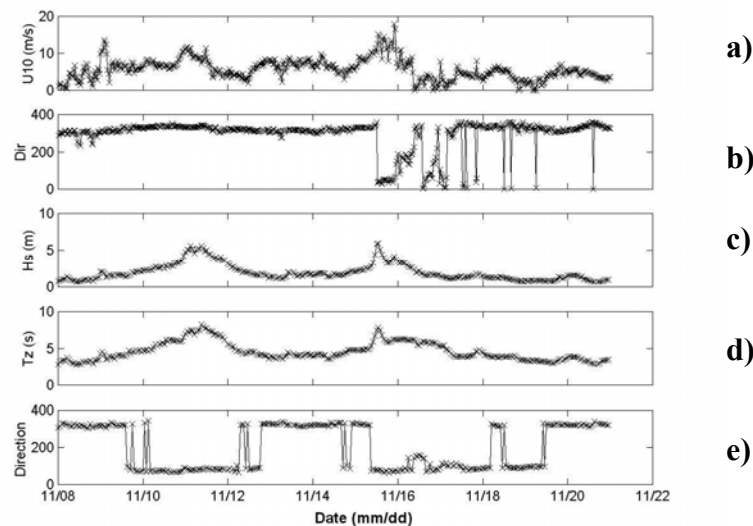


Figura 4.23. Viento y oleaje en Tortosa. a) Velocidad del viento. b) Dirección del viento. c) Altura de ola (Hs). d) Periodo medio (Tz). e) Dirección del oleaje.

Comparando las direcciones del viento y oleaje (Fig. 4.23 b y e) se observa que en condiciones de calma las olas siguen la dirección del viento. Durante el primer pico de la tormenta la influencia del *swell* se observa en las condiciones locales donde el viento sopla del noroeste mientras que las olas vienen del este. Durante el relajamiento del primer pico la dirección del oleaje regresa para coincidir con la del viento. Durante el segundo pico de tormenta se observa una gran variabilidad en la dirección del viento lo que produce también variabilidad, aunque de menor intensidad, en la dirección del oleaje.

Correlaciones entre parámetros usando waves21

De los datos obtenidos en la sección 4.2 se calcularon los coeficientes de correlación entre todos los parámetros para identificar las relaciones e importancia de un proceso físico sobre otro. Primero se estimó el coeficiente de correlación en toda la serie de tiempo y después se seccionó en 5 partes: pretormenta, primer pico, calma, segundo pico y postormenta.

Altas correlaciones se observan entre H_s y S_{max} y T_p . Es destacable que al seccionar la serie de tiempo se observan mayores correlaciones para los picos y la pretormenta; el periodo de calma muestra disminución considerable del coeficiente de correlación. Esto muestra una relación más directa entre estos parámetros en condiciones extremas. Este mismo comportamiento se observa para la correlación de H_s con los parámetros de ancho espectral N_u y ϵ . Sin embargo el parámetro de ancho espectral Q_p muestra el coeficiente de correlación muy bajo e incluso alterna de signo entre las secciones de tormenta. Las correlaciones entre H_{max} y S_{mx} , T_p , ν y ϵ también se muestran relativamente altas. El coeficiente entre H_{max} y S_{max} aumenta para el pico 1, calma y pico 2 y disminuye para la pre y post tormenta.

La densidad espectral máxima (S_{max}) muestra correlaciones medias con T_p , N_u y ϵ . Estas correlaciones aumentan en los picos y disminuyen para calmas. Un “alto” coeficiente de correlación se observa para T_p - ϵ y T_z - ϵ . En ν - ϵ , como era de esperar, se observan altos coeficientes de correlación siendo mayor en el caso de pretormenta. Sin embargo, entre ν - Q_p no se observa un claro patrón: altas correlaciones negativas excepto durante el primer pico donde el coeficiente se aproxima a cero.

4.4.2 Evolución espectral de la tormenta

Para realizar el análisis se divide la tormenta en 5 periodos:

1. Desde el inicio hasta las 00 horas del día 10 de noviembre (Pretormenta). Este primer periodo se caracteriza por ser una zona de aumento de la velocidad del viento, donde el oleaje que gobierna es el *sea*. En la figura 4.24 se muestran diferentes espectros de este periodo. En la figura 4.24a se observa claramente la evolución creciente del oleaje *sea*, primero, y su decrecimiento, después, debido a un descenso durante un periodo puntual de la velocidad del viento. En la figura 4.24b se observa como vuelve a aparecer un pico *sea* en las primeras horas hasta la aparición de la bimodalidad en los registros finales del día.

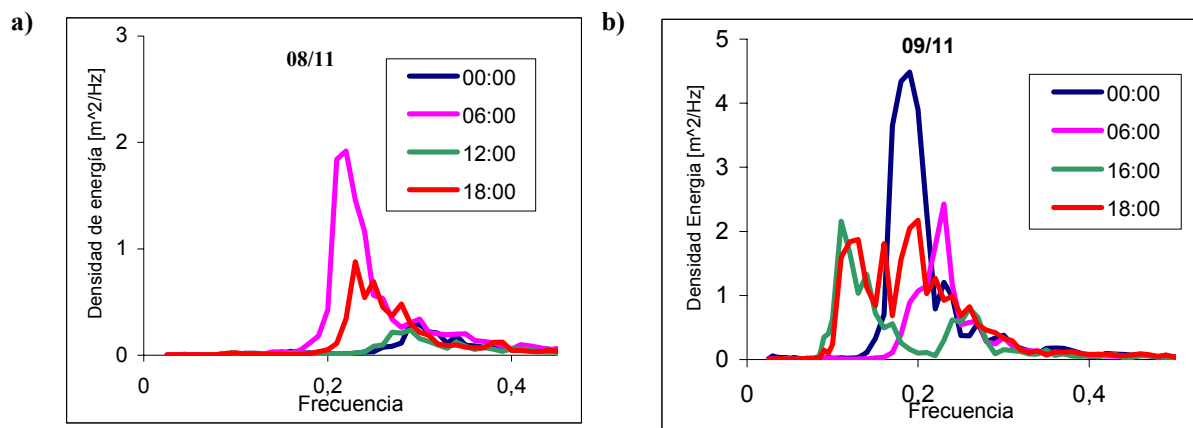


Figura 4.24. Muestra espectral del primer subperiodo. a) Día 8 de noviembre. b) Día 9 de noviembre.

2. Desde las 00 horas del día 10 de noviembre hasta las 15 horas del día 12 (primer pico). Este segundo subperiodo se constituye como el primer pico de esta primera tormenta. En esta fase se observa la presencia de *swell* (dominante) junto a oleaje *sea* (Fig. 4.25). Se observa que existe un pico muy marcado que está asociado a un gran cantidad de energía y que se encuentra en frecuencias bajas (*swell*). Por otro lado, se puede observar otro segundo pico con menor energía y en frecuencias más altas (*sea*).

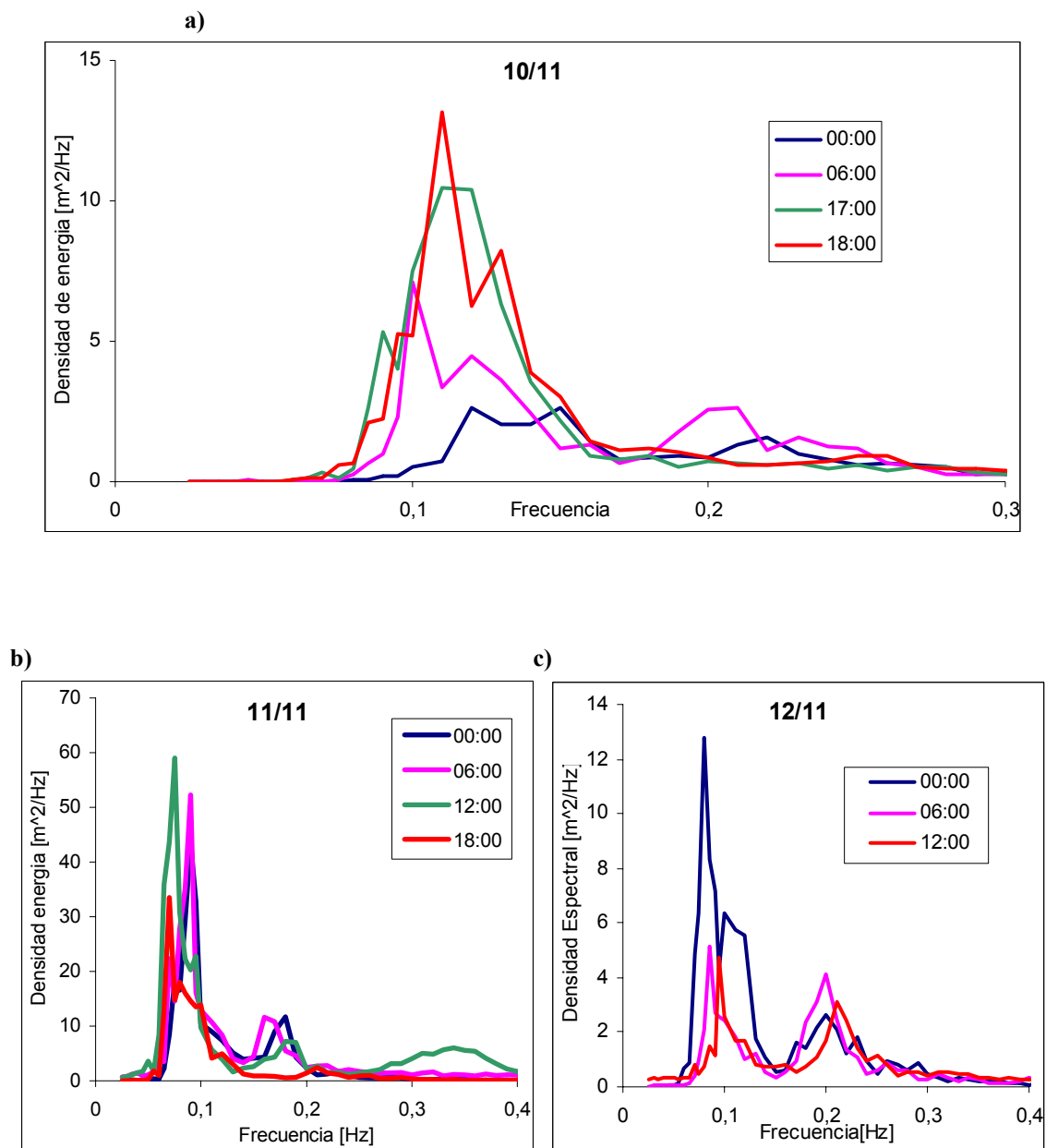


Figura 4.25. Muestra espectral del segundo subperiodo. a) Día 10. b) Día 11. C) Día 12.

3. Desde el final del subperiodo anterior hasta las 00 horas del día 15 de noviembre (Calma entre picos) (Fig. 4.26). En este caso vuelve a dominar el oleaje tipo *sea* con presencia de oleaje tipo *swell*. Se puede observar que la mayor parte de la energía se puede asociar a las frecuencias más altas, y en consecuencia, relacionado con oleaje *sea*. Aunque existe un oleaje secundario en las frecuencias más bajas, que se puede observar sobre todo en el día 14.

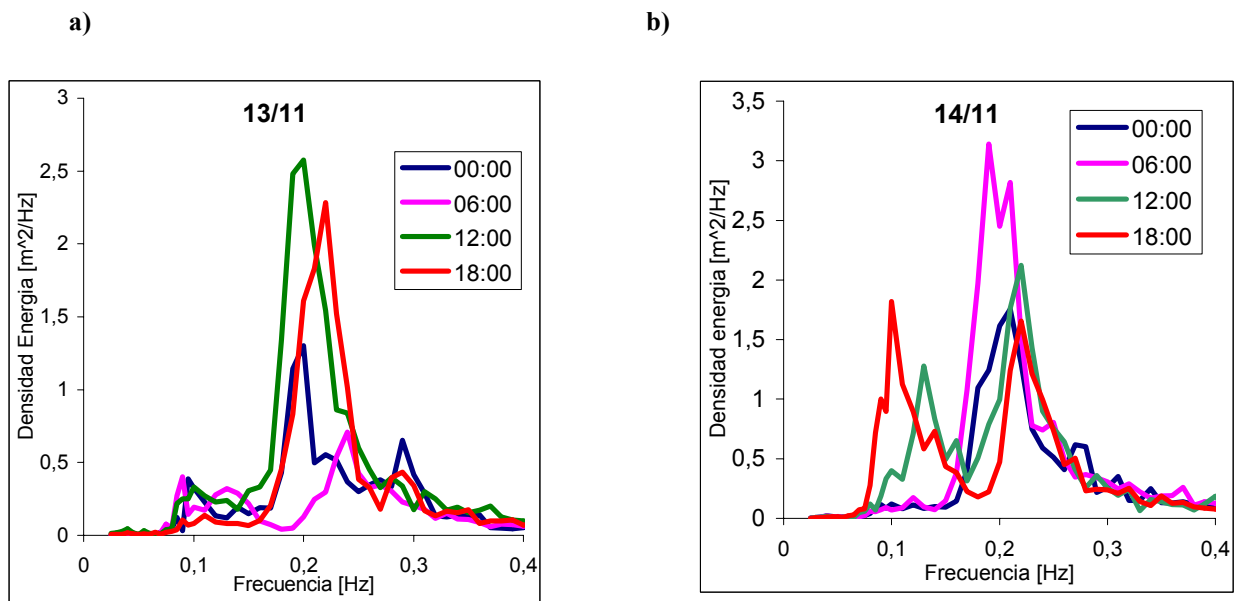


Figura 4.26. Muestra espectral del tercer subperiodo “calma entre picos”. a) Día 13. b) Día 14.

4. Desde las 00 horas del día 15 hasta las 15 horas del día 16 (segundo pico). En este subperiodo se produce el segundo pico del temporal.

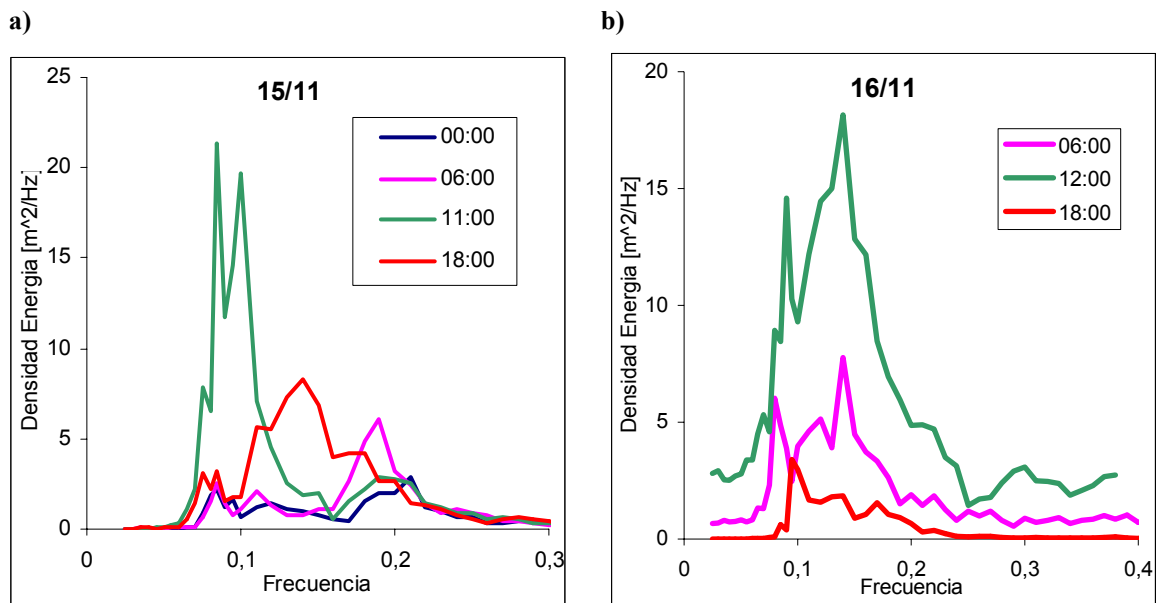


Figura 4.27. Muestra espectral del cuarto subperiodo. a) Día 15. b) Día 16.

En las figura 4.27 no se observa una tendencia muy clara. En la figura 4.27a se observa la aparición de un fuerte *swell* hacia las 11:00 horas que antes no se detecta y en los registros posteriores se observa un gran descenso de su aportación energética. La figura 4.27b tiene una estructura poca clara ya que parecen observarse 2 picos distintos muy próximos en frecuencia.

5. Desde las 16 horas del día 16 hasta las 00:00 horas del día 20/11/01 (Post tormenta) (Fig. 4.28). En este último periodo el temporal mengua en intensidad alternando el dominio entre el oleaje *swell* y el leve *sea*. En la figura 4.28a se observa una estructura bimodal, en la figura 4.28b se observa otra estructura bimodal con un dominio *sea*.

Dada la magnitud del temporal, es un caso importante de estudio, que permite obtener un análisis de la generación y las consecuencias que tormentas intensas pueden tener. Un estudio detallado mediante los espectros permitirá analizar diferentes aspectos relevantes de todo el proceso.

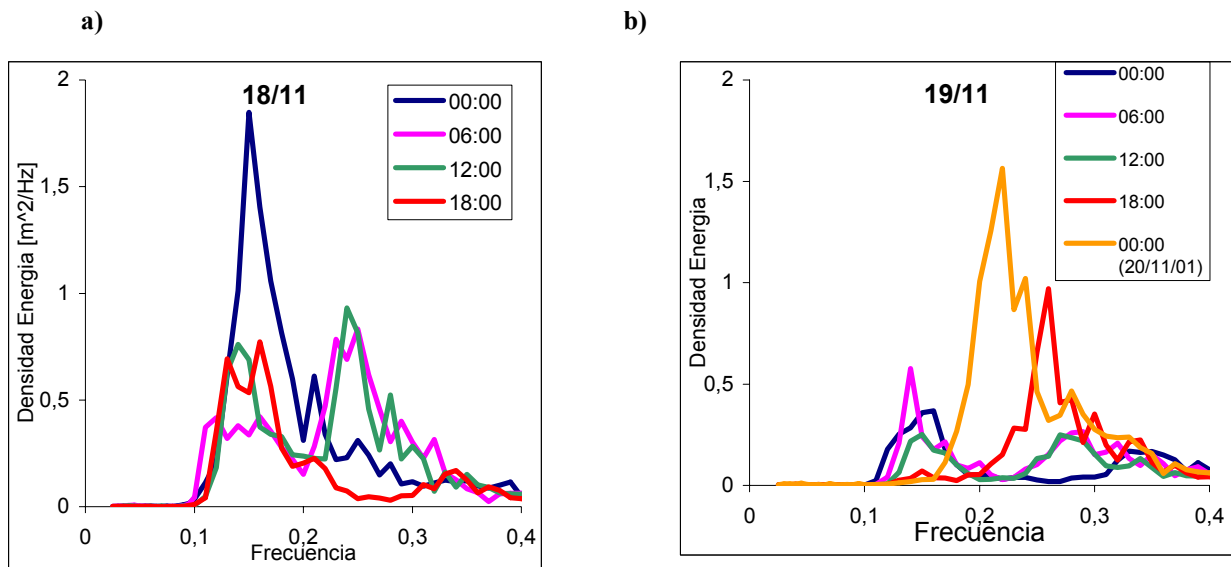


Figura 4.28. Muestra espectral del quinto subperiodo. a) Día 18. B) Día 19.

Caracterización de espectros en el primer pico

El primer pico del temporal comprenderá desde las 00:00 horas del día 10 de noviembre del 2001 hasta las 15 horas del día 12 de noviembre. Utilizando la clasificación de los espectros de *Lepatoukin (2002)* se clasificaron los espectros de la tormenta. La separación de *sea* y *swell* se hizo visualmente considerando las direcciones y los anchos de los picos. La tabla 4.5 muestra los resultados.

Clase	Subclase	10 de noviembre	11 de noviembre	12 de noviembre	Número total de registros
I	I-1				0
	I-2				0
II	II-1	13	15	12	40
	II-2				0
	II-3				0
Total		13	15	12	40

Tabla 4.5. Clasificación del oleaje para el primer pico de la tormenta.

El grupo de espectros de dos picos (clase II) es caracterizado por la existencia de dos sistemas de olas simultáneos, dentro del cual se considera el sistema de espectros variado con separación tanto en la frecuencia como en la dirección (II-1). Dicho oleaje es un sistema único dentro de este primer pico. Tenemos que destacar que en los registros 16h, 17h y 18h del 10/11, el oleaje *sea* es muy débil, con un claro dominio del oleaje *swell* que puede llegar a confundirse por un sistema unimodal de olas.

La evolución sufrida por la densidad energética pico a lo largo de este periodo se muestra en la figura 4.29.

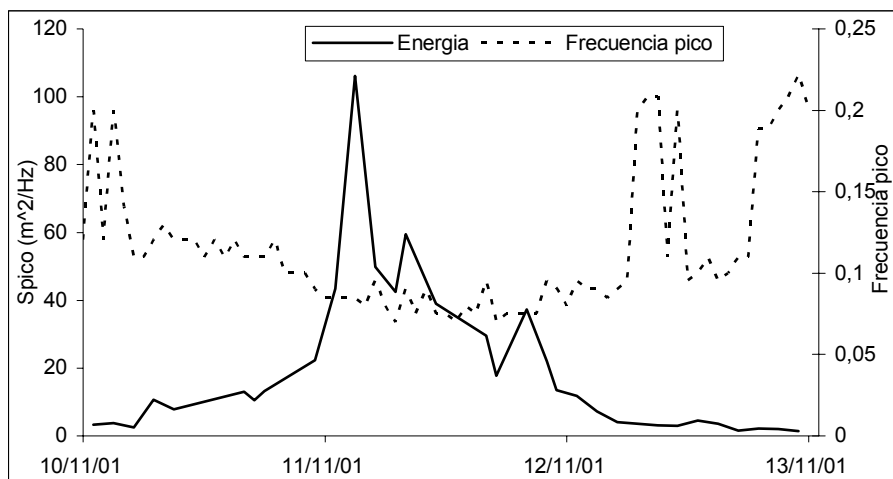


Figura 4.29. Evolución energética para la frecuencia pico.

El día 10 de noviembre empieza caracterizado por espectros bimodales variados con separación tanto en la frecuencia como en la dirección. En los registros hasta las 9 de la mañana prevalece el sistema bimodal formado por $(\omega_{\text{pico1}}, \theta_{\text{pico1}}) = (0.12 \text{ Hz}, 78^\circ)$ y $(\omega_{\text{pico2}}, \theta_{\text{pico2}}) = (0.22 \text{ Hz}, 335^\circ)$, siendo el primero tipo *swell* y el segundo tipo *sea*. En dicho registro, se observa que el primero de los picos ha experimentado una evolución ascendente en términos energéticos, y el segundo ha experimentado una disminución respecto a los registros anteriores, aunque la presencia de dicho pico significa una aportación energética importante. La evolución en los siguientes registros producirá que entre las 15 y las 19 horas domine el oleaje tipo *swell* (0.12 Hz, 70°) sobre un débil oleaje *sea*.

Posteriormente los picos se presentan en las posiciones (0.12 Hz, 65°) y (0.19 Hz, 335°), es decir, con una distribución bastante parecida a la bimodal que imperaba en el inicio del día.

El día 11 de noviembre continúa la tendencia bimodal del día anterior con picos situados, aproximadamente, en la misma posición, es decir (0.10 Hz, 75°) y (0.19 Hz, 335°). Debe destacarse que dentro del pico se puede apreciar en los espectros direccionales una dispersión energética, asociada al pico *swell*, en una frecuencia reducida y a lo largo de un rango de direcciones. Esta situación puede verse en el espectro direccional de la figura 4.30.

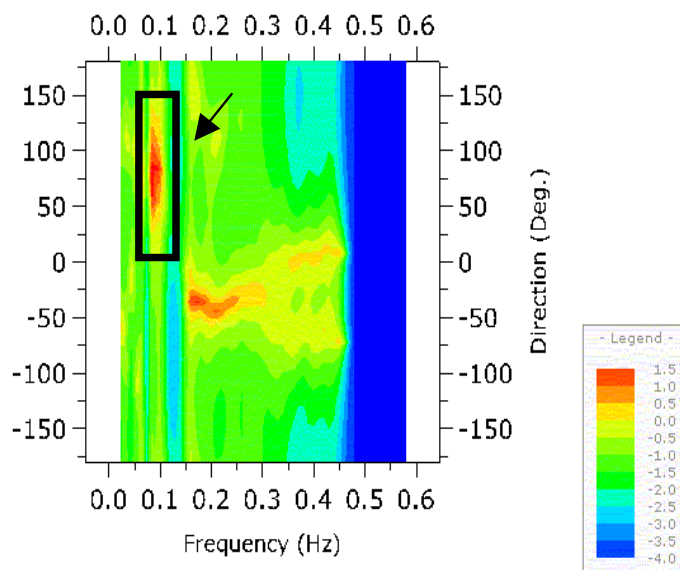


Figura 4.30. Espectro direccional del registro 3:00 horas 11/11.

La dirección media del pico se encuentra alrededor de los 86° . El pico *swell* tiene una dispersión direccional amplia mientras que se sitúa en una frecuencia de 0.09 Hz. El rango de frecuencias en que se puede ver es muy estrecho y el rango angular es muy ancho. Esta tendencia también se puede observar en otros registros, como por ejemplo las 22 horas, aunque se presenta a menor escala. En la figura 4.31 se puede observar el espectro escalar referido al mismo registro.

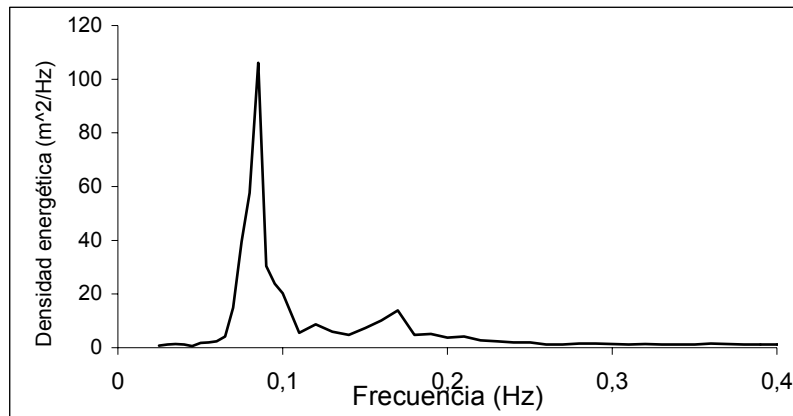


Figura 4.31. Registro escalar de las 3 horas del 11/11.

El día 12 de noviembre el temporal mengua. Los espectros son del tipo II-1 con los picos (0.9 Hz, 75°) y (0.22 Hz, 335°).

Caracterización de espectros en el segundo pico

El segundo pico del temporal comprenderá el periodo entre las 00:00 horas del día 15 de noviembre del 2001 y las 15 horas del día 16 de noviembre. Se seguirá utilizando la comparación de las condiciones direccional como escalar en los espectros. La clasificación que tenemos en este caso se muestra en la tabla 4.6:

Clase	Subclase	15 de noviembre	16 de noviembre	Número total de registros
I	I-1		3	3
	I-2			0
II	II-1	8	2	10
	II-2		2	2
	II-3	6		6
Total		14	7	21

Tabla 4.6. Clasificación del oleaje para el segundo pico de la tormenta.

Destaca, como en el primer pico de la tormenta, la existencia del oleaje caracterizado por espectros de dos picos (II), con existencia de dos sistemas simultáneos de olas dentro de los cuales predomina el sistema de picos espectrales variados con separación tanto en la frecuencia como en la dirección (II-1) en el día 15 de noviembre. Existen otro grupos dentro del grupo II: espectros variados con separación sólo por la dirección (con sólo un pico en el espectro de la frecuencia y dos picos en la distribución angular) y espectros con oleaje variado con separación sólo por la frecuencia.

Otro grupo de oleaje se puede ver en los espectros con un sólo pico (I), donde prevalece únicamente el sistema (I-1), es decir, tipo *sea*.

En este segundo pico de la tormenta el oleaje *sea* aporta un papel energético más importante que en el primero aunque el valor energético mayor de la tormenta lo produce el *swell*.

La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este segundo pico del temporal se puede seguir en la figura 4.32.

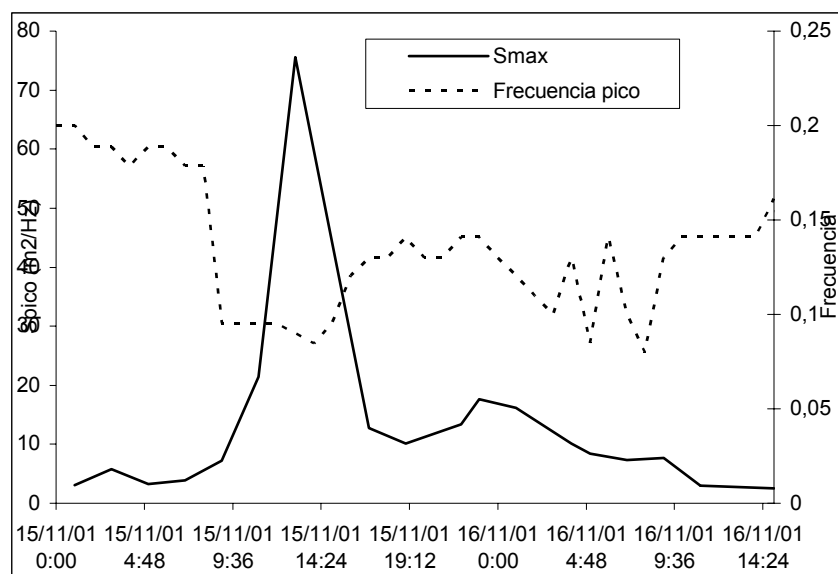


Figura 4.32. Evolución energética para la frecuencia pico.

La evolución energética espectral máxima de esta segunda parte de la tormenta tiene un máximo muy marcado, que se produce en el registro de las 13:00 horas del 15/11. Luego desciende pero se mantiene energéticamente estable, alrededor de 5 - 15 m²/Hz, hasta el final del periodo considerado. Si comparamos la evolución de la energía del primer pico del temporal, figura 4.29, y la comparamos con la figura 4.32, se observa que en el primer pico considerado se tiene una

densidad energética pico bastante superior a este segundo periodo, aunque ambos tienen una altura de ola significativa muy similar.

En el periodo de inicio del segundo pico del temporal, 0:00 horas del 15/11/01, se encuentra una tendencia bimodal con un oleaje *swell* y otro *sea*. El oleaje tipo *swell* viene de la dirección 100°, en la frecuencia 0.085 Hz, y el *sea* de 335°, con frecuencia 0.21 Hz. Esta tendencia se mantiene hasta las 5 horas aunque el pico *swell* es más débil que el *sea*.

Alrededor de las 6 horas empieza a cambiar gradualmente la dirección del viento. Esta evolución llevará la dirección del viento, que en los anteriores registros soplaban en la dirección 330°, hasta la dirección 75°. El pico *sea* situado en la dirección 330° menguará, debido al cambio de la dirección del viento, hasta las 13 horas, cuando desaparece.

En la dirección 75° se acaba observando que el oleaje *swell* tendrá un aumento energético. El cambio de dirección del viento también acaba por crear un oleaje *sea* en la misma dirección que dicho *swell*. La tendencia del pico principal se mantendrá situada en la dirección 75°.

El día 16 la dirección del viento cambia, presentando una variación entre 130° y 180°. En los primeros registros del día 16 existe una tendencia dominante de *sea* y con la variación de la dirección del viento, aunque se mantiene el pico situado en la dirección 75°, aparece otro pico situado en el rango de la nueva dirección del viento aunque de menor importancia dado que la fuerza del viento mengua. El conjunto global de acontecimientos produce que en los registros considerados hasta el fin de este segundo pico se presenten una sucesión de registros de tipo I-1, II-1 o II-2, aunque la aportación energética del *sea* sea menor.

4.4.3 La edad del oleaje

Se realizaron estimaciones de la edad de las olas (C_p/U_{10}) para esta tormenta. Se utilizaron mediciones de las boyas y estaciones meteorológicas cercanas a las boyas para los datos de viento. Se utilizaron datos de cada hora, promediados cada media hora para el viento y cada 20 minutos para las olas. Además se realizaron estimaciones de la edad de las olas substituyendo U_{10} por la velocidad de fricción (U_*) utilizando:

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad [4.1]$$

$$C_D = 0.0012875 \quad U_{10} < 7.5 \text{ m/s}$$

$$C_D = (0.8 + (0.065 U_{10})) 10^{-3} \quad U_{10} > 7.5$$

Donde

U_{10} = Velocidad del viento

C_D = Coeficiente de arrastre

Los resultados obtenidos utilizando la velocidad de fricción fueron muy similares a lo observado con la velocidad del viento, ya que la relación entre la velocidad del viento y la velocidad de fricción es lineal y el valor crítico para el incremento del coeficiente de arrastre es de 7.5 m/s.

Se observa (Fig. 4.33) que en Rosas el oleaje más joven se presenta al inicio de la tormenta antes del primer pico, mientras que el oleaje viejo se observa antes de la tormenta y también en el primer pico de tormenta. En Blanes el oleaje más joven se presenta al inicio de la tormenta y el más viejo en los periodos de calma. Sin embargo, en ningún momento se alcanza $C_p/U_{10} < 1$ por lo que en realidad se tendría que hablar, exclusivamente, de oleaje viejo. De la misma manera en el Llobregat la edad de las olas supera el valor crítico de 1, mostrando las mayores edades después del primer pico de tormenta. En Tortosa la edad de las olas se encuentra alrededor de 1 al inicio de la tormenta y en el periodo de calma entre el primer y segundo pico. El oleaje más viejo se presenta después de los picos de tormenta.

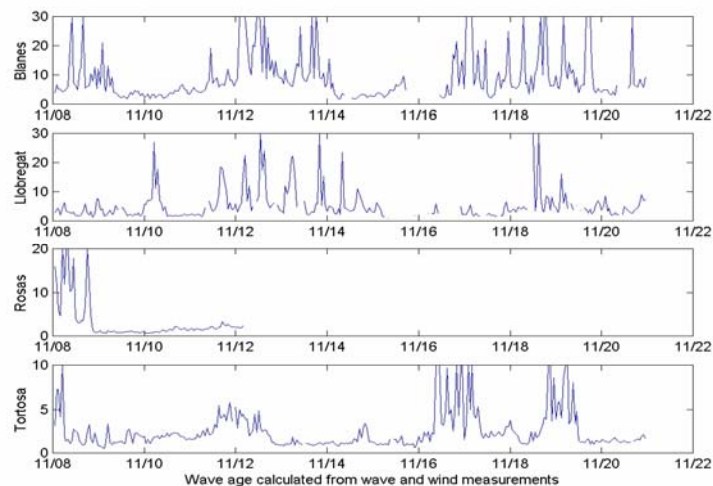


Figura 4.33. Edad del oleaje en las 4 boyas durante la tormenta de Noviembre 2001.

La edad del oleaje que se utiliza habitualmente es la relación entre la velocidad de fase correspondiente al pico espectral con la velocidad del viento a 10 metros de altura. En consecuencia para conocer el valor de un registro determinado necesitamos conocer el periodo pico (o frecuencia pico) y la velocidad de viento. El resultado obtenido es un simple valor que refleja el conjunto de todo un registro sin tener en cuenta la existencia de *swell* o la forma del espectro. En el caso que existan dos trenes de ondas, el simple valor de la edad sólo refleja la influencia sobre el más importante de ambos. De otro modo, la edad es una medida del estado de desarrollo del mar, pero en tal caso es difícil de reconocer si es un mar creciente o decadente, para un registro dado.

Para velocidades de viento ligeras y moderadas sobre la superficie del mar, la dependencia de aspectos direccionales del estado del mar es probable que confundan todo aquello que depende de la edad (*Bourassa et al., 1999*). Las consideraciones de olas capilares y *swell* son críticas para modelar flujos en áreas de velocidades de viento bajas y moderadas. Muchos modelos no son suficientemente detallados para bajas y moderadas velocidades de viento ($U_{10} < 7$ m/s; aproximadamente un 30 % de los vientos en el primer periodo estudiado y un 28 % de los vientos en el segundo periodo estudiado), y tienden a subestimar flujos en estos regímenes.

Dada la importancia de dicho parámetro y su simplicidad, es necesario reflejar la influencia del viento en el conjunto del registro, en todas las frecuencias. Y sería interesante conocer con el valor de dicho parámetro si su evolución es creciente o decreciente. Para esto, se intenta presentar el efecto de la edad a lo largo de un determinado registro. Esta situación se ha conseguido mediante el proceso siguiente:

- Obtención de los datos espectrales para cada registro. En dicho registro se observa la energía unitaria (la frecuencia pico tiene para la energía un valor unitario, mientras el resto de frecuencias tienen un valor proporcional inferior).
- Obtener el valor de la celeridad de cada frecuencia del espectro.
- Obtener la velocidad del viento para cada registro.
- Obtener el valor de la edad del oleaje a lo largo de todo el registro mediante la formulación:

$$Edad(f) = \frac{C(f)}{U_{10}} \cdot S_{unitaria}(f) \quad [4.2]$$

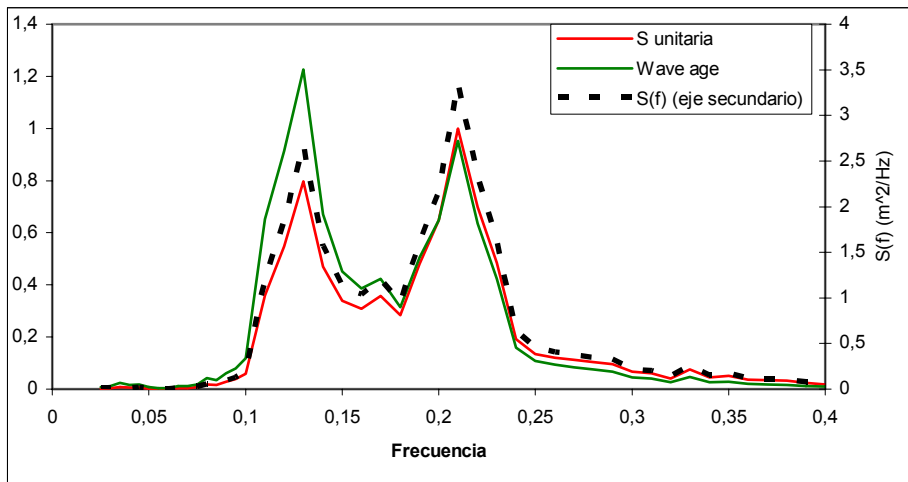


Figura 4.34. Registro 10/11/01 01:00 horas.

En la figura 4.34 se observa la presencia de dos oleajes, uno *swell* y el otro *sea*. En este caso, el oleaje *sea* tiene ligeramente más energía que el *swell*, aunque este oleaje presenta una edad ($= 1.22$) superior al presentado por el *sea* ($= 0.95$). Para tal caso se puede observar que el hecho de considerar un único valor de la edad proporcionaría una situación poco real dada la existencia de dos sistemas de ondas diferenciados, y la representación con la edad de un único tren de ondas (*swell*). La ventaja que presenta este método es la posibilidad de conocer el valor de la edad a lo largo de todo el espectro.

Debe observarse que las figuras de la evolución presentan de forma clara y diferenciada los diferentes picos, mostrando el valor de la edad para cada pico. Mediante la comparación de cada registro se puede conocer la evolución de los picos (creciente o decadente).

La gran presencia de espectros bimodales tiene importantes implicaciones para los cálculos de la edad del oleaje. En ambos picos de la tormenta claramente el oleaje (pico) es *swell* por lo que se puede considerar oleaje viejo. Sin embargo, la intensidad del viento local es considerable por lo que será importante estimar la importancia de esta condición para el estado del mar. Esto nos lleva a definir adecuadamente la edad de las olas no sólo considerando el pico, sino también la energía (edad) fuera del pico, que podría llegar a ser considerable, y que está relacionada con las condiciones del viento local.

Dada la relación del parámetro de la edad desarrollado a lo largo de cada registro, se puede observar si un determinado oleaje crece o es decadente. Representando la evolución de la edad en tres dimensiones se puede observar su desarrollo tanto a lo largo del tiempo, como a lo largo de todas las frecuencias dentro de un mismo registro. Se puede observar si el oleaje se está generando, si es decadente o en rango de saturación; de este modo, se puede utilizar como criterio de discriminación *sea/swell*. A continuación se presentarán los periodos más significativos.

En la figura 4.35. se puede observar un oleaje en las frecuencias más bajas desarrollándose a lo largo del periodo del primer pico de tormenta, donde la frecuencia de pico se reduce y valor de edad del oleaje > 1 es cada vez más grande. Por otro lado se observa un oleaje *sea* en las frecuencias más altas pero que en los últimos registros presenta un valor de edad muy alto (producido por la reducción de la velocidad del viento).

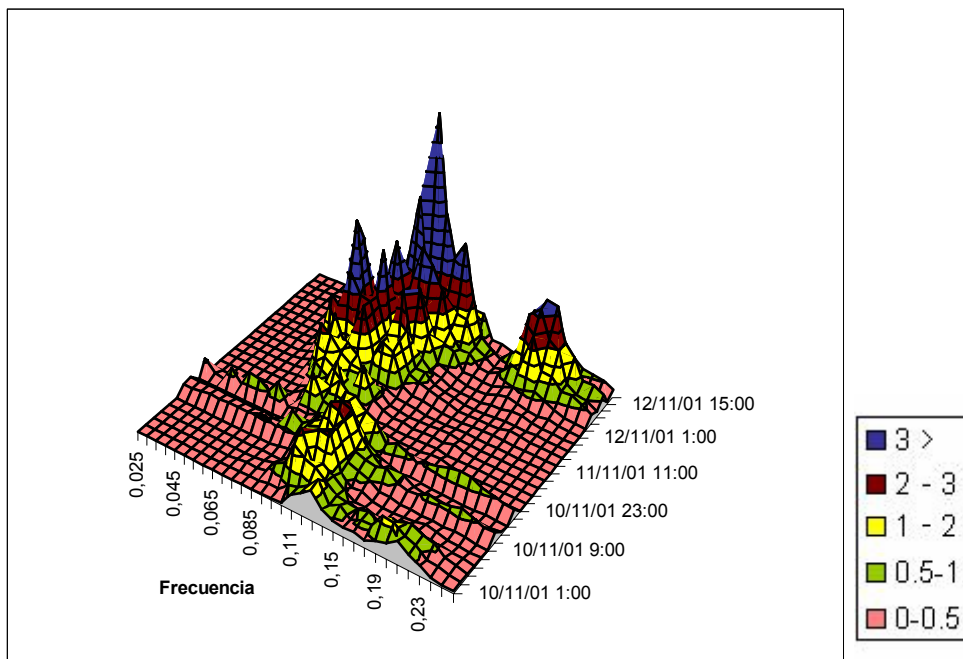


Figura 4.35. Evolución de la edad utilizando todo el espectro.

En la figura 4.36 se observa el periodo de calma entre los picos de la tormenta, se muestra en el inicio la existencia de la bimodalidad con *sea* y *swell*. Este último oleaje termina por disminuir su aporte energético mientras que el *sea* se mantiene. Al final del periodo se vuelve a observar el *swell*.

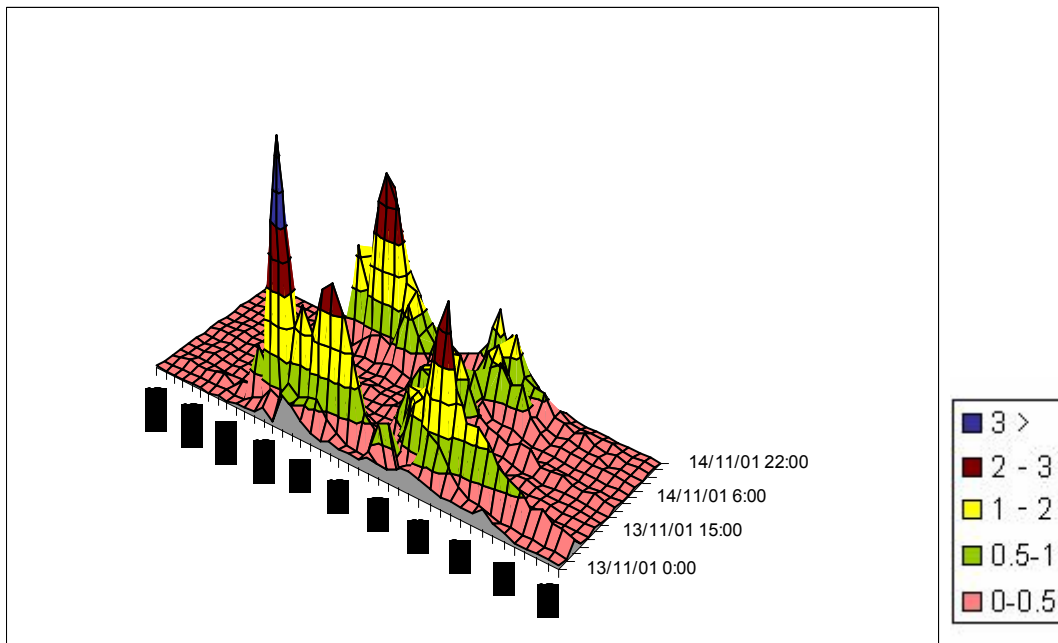


Figura 4.36. Evolución de la edad en todo el espectro.

En la figura 4.37 se observa el periodo correspondiente al segundo pico de tormenta, en el cual domina claramente un oleaje *swell* (aunque en la figura se puede observar un leve *sea*). El *swell* en su evolución se observa que cada vez muestra una mayor “edad” y abarca más frecuencias alrededor del pico.

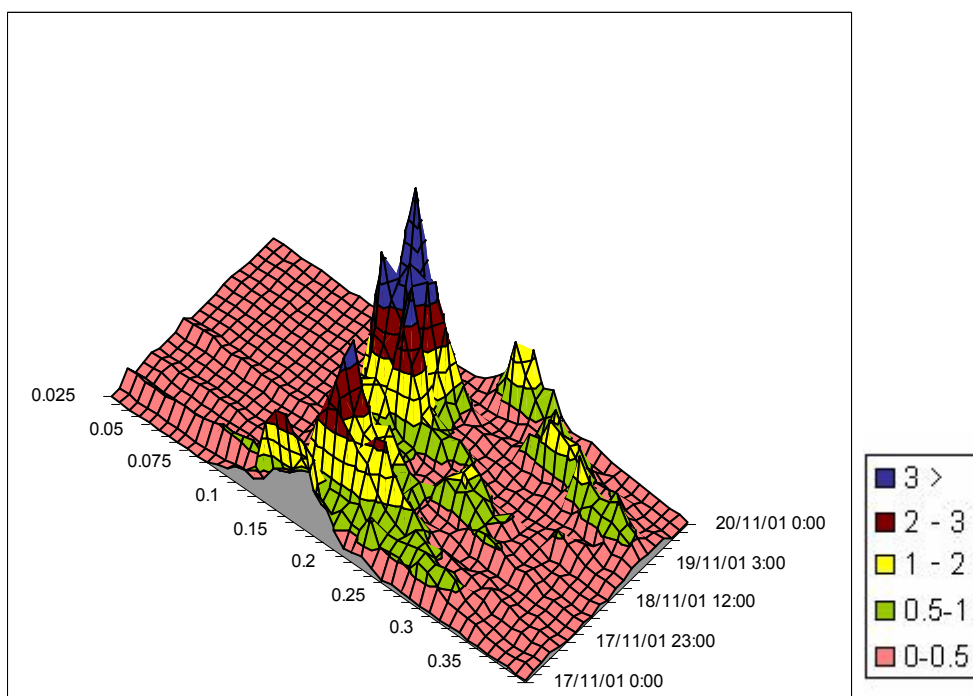


Figura. 4.37. Evolución de la edad utilizando todo es espectro.

4.5 Tormenta de Marzo-Abril 2002

4.5.1 Condiciones generales

Las condiciones sinópticas durante el 28 de marzo muestran una baja presión en el Atlántico noreste, produciendo vientos geostroáficos del SE en la costa catalana con *fetch* máximos de 700 km para la costa norte y de 300 km para la sur. Durante el 29 a las 0:00 (Fig. 4.38), día en que se registro la máxima altura de ola, un sistema de baja presión se estableció en el sur del Mediterráneo aumentando los gradientes de presión y produciendo fuertes vientos del este con *fetch* de aproximadamente 500 km. Durante el día 30 la situación sinóptica se relaja, disminuyendo el gradiente de presión hasta el día 2 de abril, cuando otro sistema de bajas presiones es generado y localizado sobre Mallorca con vientos muy intensos y con vientos del NE para la costa sur catalána. Posteriormente este sistema se relaja y produce alta variabilidad en los vientos, durante el día 4 el sistema se intensifica nuevamente produciendo vientos del E en la costa norte catalana.

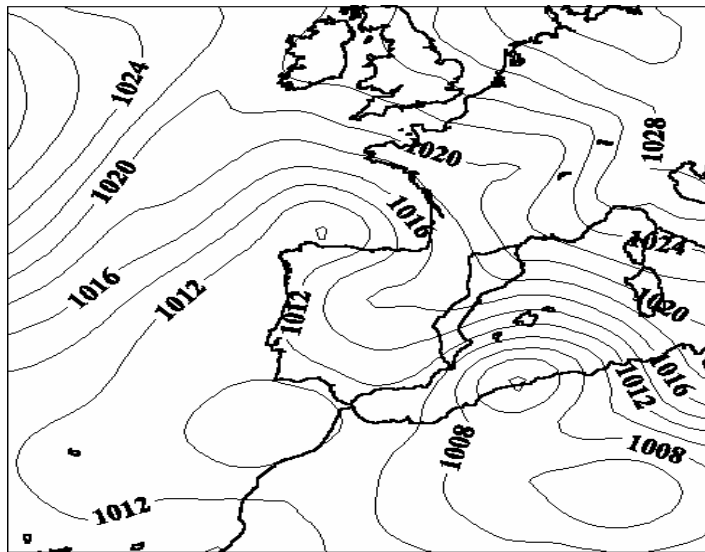


Figura 4.38. Carta sinóptica del día 29 de marzo a las 0:00.

La tormenta de oleaje inicia durante el 28 de marzo cuando en las cuatro boyas se registra oleaje alrededor de 0.5 m de altura significativa, pero alcanzando valores de 4 m (Fig. 4.39). La boya de Tortosa registró los valores máximos al final del día 28 mientras que el resto de las boyas durante el 29. Este desfase puede explicarse por el movimiento del sistema de bajas presiones de sur a norte durante el 28 y 29 de marzo.

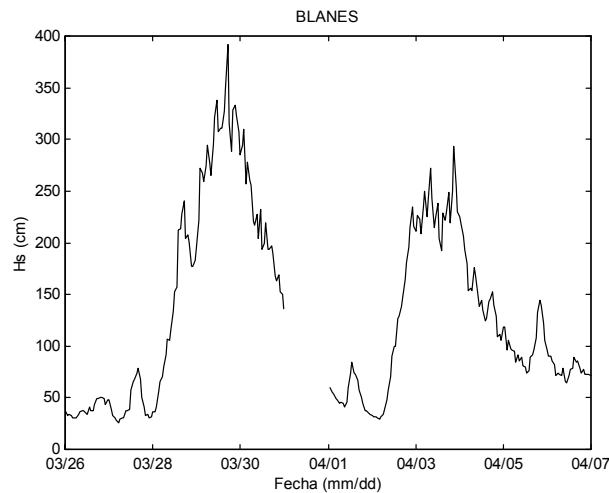


Figura 4.39. Registro de Hs en la localidad de Blanes.

A las 12:00 del día 2 de abril se inicia el crecimiento del oleaje de lo que sería un segundo pico de tormenta alcanzando Hs máxima de 3.5 m en Rosas. Los picos máximos para este segundo evento se registraron en las primeras horas del día 3 de abril. El periodo medio alcanza 8 segundos para los picos de las tormentas (Fig. 4.40). La dirección del oleaje registrada en la boya direccional de Tortosa (Fig. 5.41) muestra que para la primera tormenta la dirección se mantuvo constante en dirección este (viento de Levante), mientras que para el segundo pico se presenta una gran variabilidad entre NW y E, terminando la tormenta en dirección S. Esto se explica por la migración del centro de baja presión generando cambios locales bruscos en la dirección del viento y por lo tanto en la dirección del oleaje localmente generado.

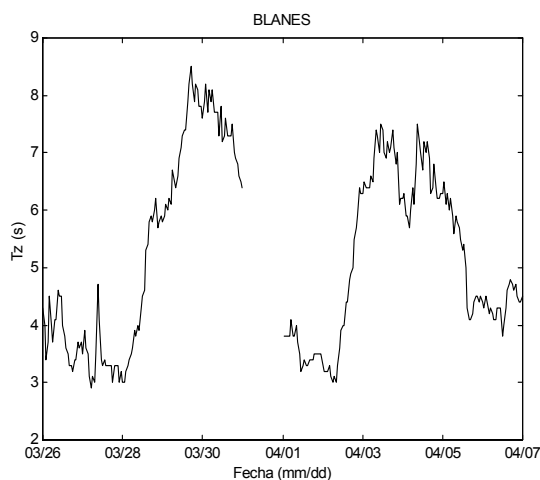


Figura 4.40. Registro de Tz en Blanes.

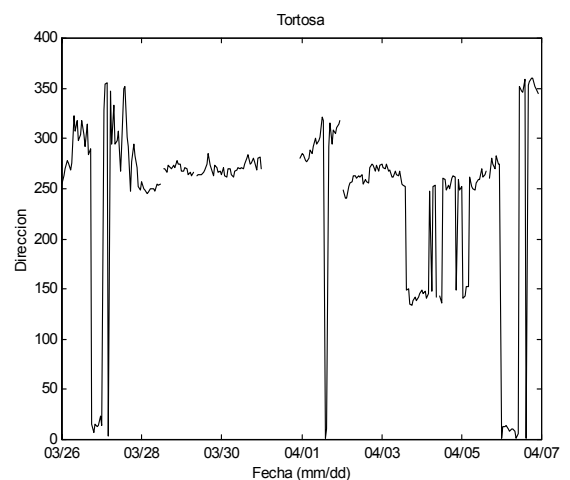


Figura 4.41. Registro de dirección en Tortosa.

4.5.2 Evolución espectral de la tormenta

Al igual que para la tormenta de Noviembre 2001, se ha realizado una caracterización espectral para la tormenta de Marzo-Abril 2002 y se ha dividido la tormenta en subperiodos.

1. El primer periodo desde el inicio, 27/3/02 00:00 horas, hasta las 10 horas del día 28 (pretormenta), se caracteriza por ser una zona de aumento de viento, donde el oleaje que gobierna es el *sea*. En la figura 4.42 se muestran diferentes espectros de este periodo. Se observa que los oleajes no poseen una gran densidad energética, sin embargo, se aprecia una evolución del oleaje *sea*, donde la frecuencia pico disminuye y la densidad energética del pico aumenta.

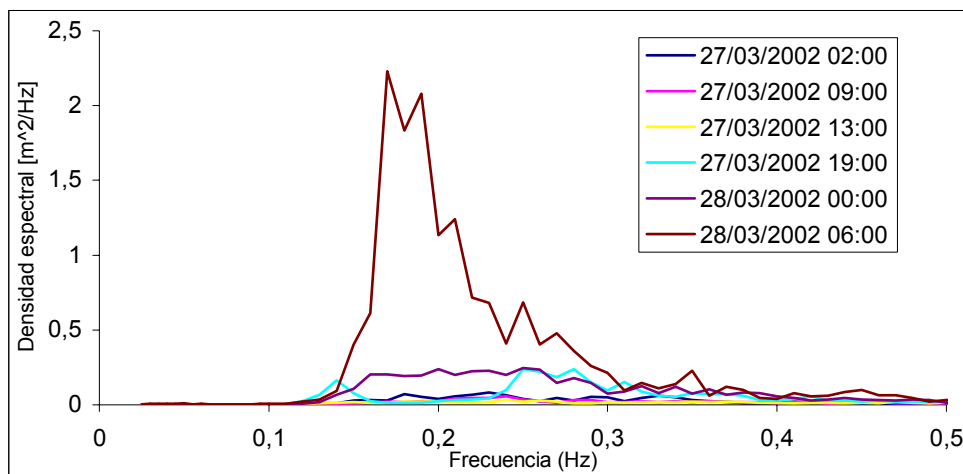


Figura 4.42. Muestra espectral del primer subperiodo.

2. El segundo sub-periodo, desde las 11 horas del 28 de marzo hasta las 12 horas del día 30 (primer pico). En esta fase se observa que el oleaje unimodal *sea* empieza siendo el dominante, transformándose en el final del temporal en oleaje *swell*. En la figura 4.43 se observa como el oleaje *sea* continúa disminuyendo en frecuencia y aumentando en densidad energética. Después de llegar a su máxima densidad energética continuará disminuyendo tanto en frecuencia como en densidad.

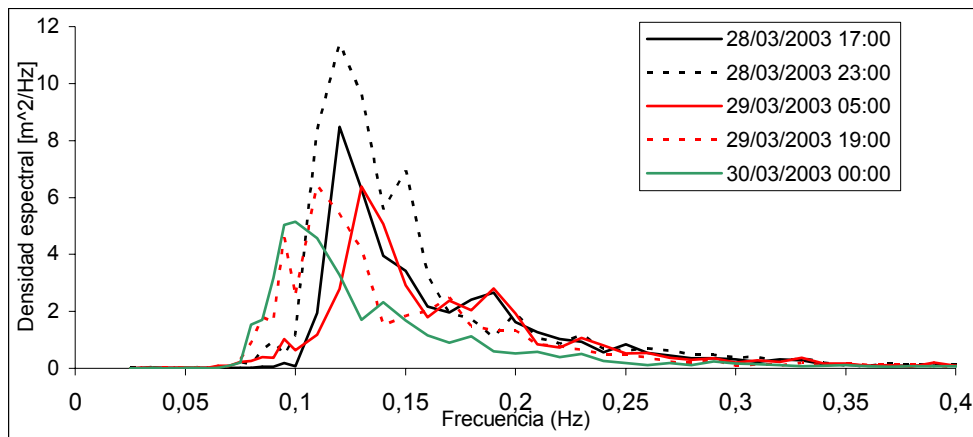
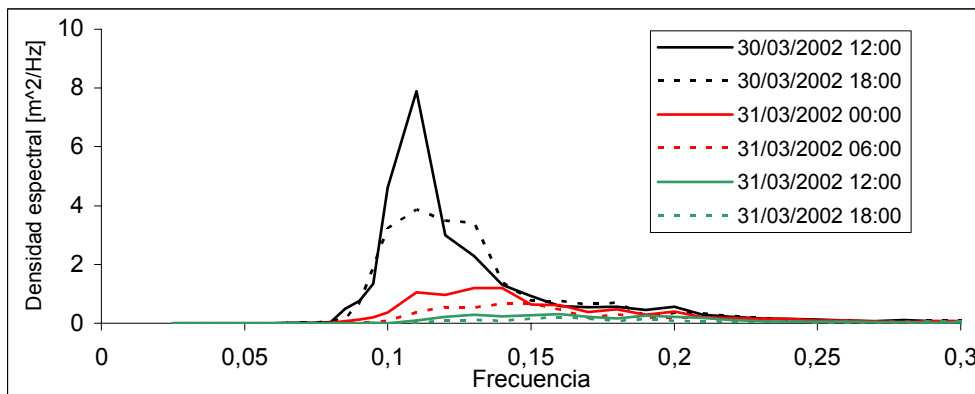


Figura 4.43. Muestra espectral del segundo subperiodo.

3. El siguiente intervalo comprende desde el final del subperiodo anterior hasta las 10 horas del día 2 de abril (calma entre picos). En este caso continúa el oleaje tipo *sea*. En la figura 4.44a se observa como el oleaje pierde densidad energética progresivamente, situación que termina en la figura 4.44b.

a)



b)

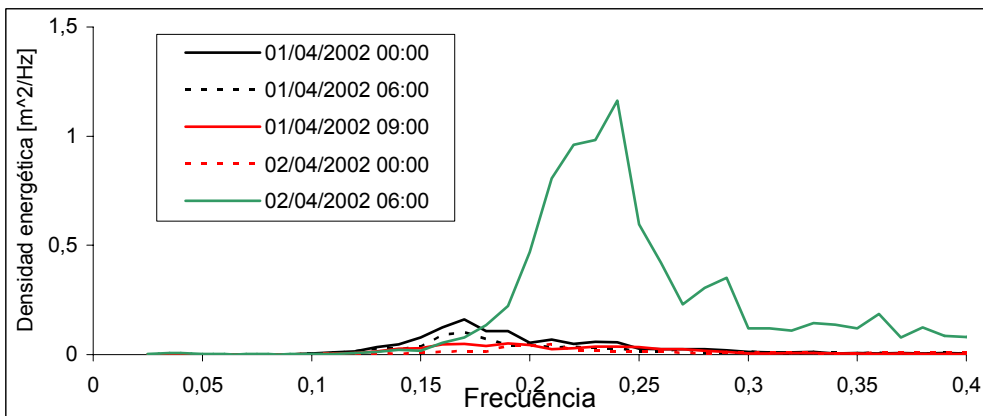


Figura 4.44. Muestras espectral del tercer subperiodo. a) Día 30 y 31. b) Días 1 y 2.

4. El siguiente sub-periodo va desde las 11 horas del día 2 de abril hasta las 11 horas del día 4 (segundo pico). En la figura 4.45 se observa que el oleaje *sea* aumenta en densidad energética y disminuye en frecuencia pico convirtiéndose en un oleaje *swell*. Está clara la existencia del oleaje *sea* primero y después de *swell*.

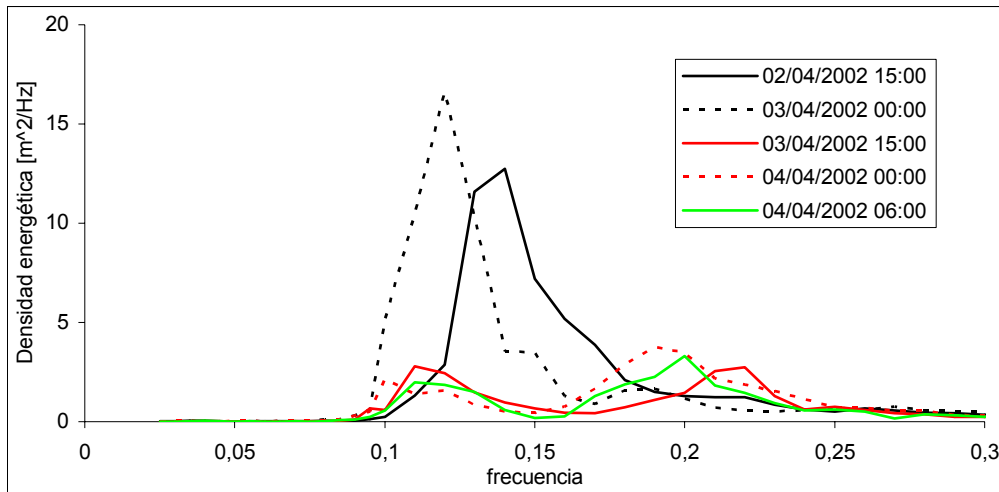


Figura 4.45. Muestra espectral del cuarto subperiodo.

5. Desde las 12 horas del día 4 hasta el final (post-tormenta). En este último periodo el temporal mengua en intensidad con oleaje bimodal tipo *swell* y *sea* (Fig. 4.46).

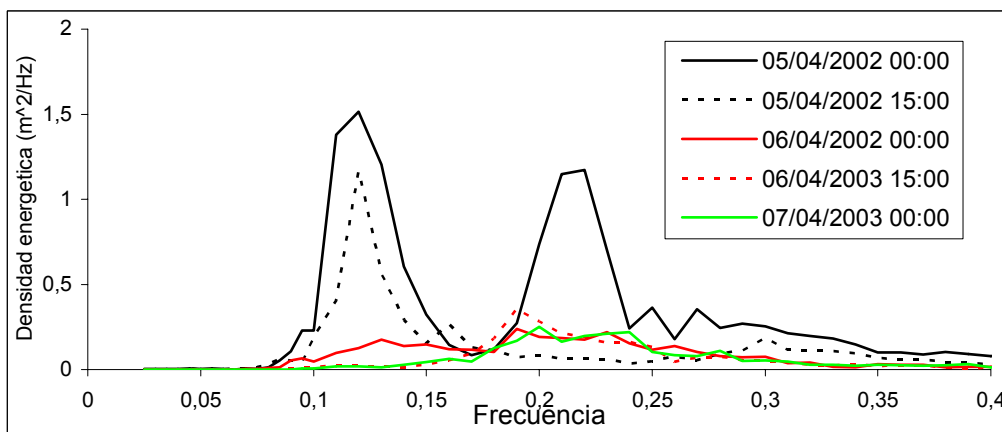


Figura. 4.46. Muestra espectral del quinto subperiodo.

Caracterización de espectros en el primer pico

El primer pico del temporal comprenderá desde las 11:00 horas del día 28 de marzo del 2002 hasta las 12 horas del día 30 de marzo del 2002. El análisis espectral va a ser análogo al realizado en la tormenta de noviembre del 2001. Del conjunto de registros válidos escogidos, un total de 27 (Tabla 4.7) se observan dos clases de oleaje, I-1 y I-2. La evolución sufrida por la densidad energética pico a lo largo de este periodo del temporal considerado fue la que se observa en la figura 4.47. Este primer pico de la segunda tormenta se caracteriza por un oleaje tipo *sea* principalmente en la primera mitad y *swell* en la segunda mitad; la dirección del oleaje se puede observar en la figura 4.48.

Clase	Subclase	28 de marzo (desde 11:00 horas)	29 de marzo	30 de marzo (hasta 12:00 horas)	Número total de registros
I	I-1	5	8		13
	I-2		3	11	14
II	II-1				0
	II-2				0
	II-3				0
Total		5	11	11	27

Tabla 4.7. Clasificación del oleaje para el primer pico de la tormenta.

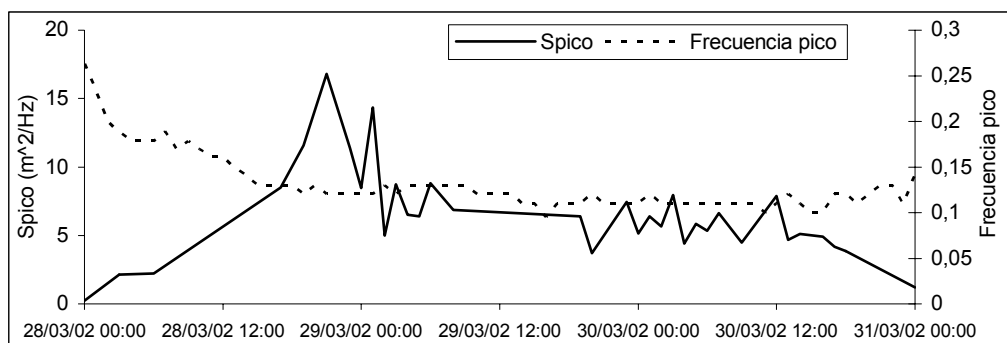


Figura 4.47. Evolución energética para la frecuencia pico.

El día 28 de marzo empieza caracterizado por un fuerte viento de levante con valores que llegan hasta los 11 m/s. La intensidad del viento se mantiene a lo largo de todo el día, oscilando entre los 10 y los 13 m/s. El oleaje se mantiene moderadamente alineado con la dirección del viento hasta las 18 horas, momento a partir del cual se produce una progresiva variación de la dirección del viento, respecto la dirección del oleaje que se mantiene constante dentro del intervalo entre los 70° y los 90°. El oleaje alcanza su máxima densidad energética espectral a las 21 horas, decayendo a

continuación, a consecuencia de que la velocidad del viento se mantiene fuerte, pero la progresiva desviación de la dirección del viento produce que la transmisión de la energía disminuya.

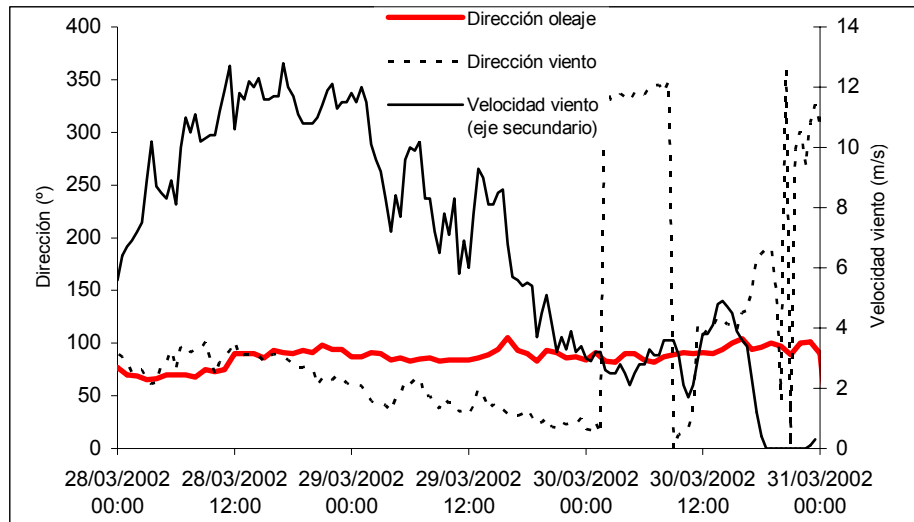


Figura 4.48. Evolución de la dirección del oleaje (Tortosa) y del viento (Illa de Buda).

El día 29 de marzo continúa la tendencia de desviación del viento respecto del oleaje que responde lentamente al cambio de dirección del viento. El oleaje continúa con una dirección entre los 60° y los 100° , más o menos constante. La frecuencia pico continúa descendiendo hasta valores alrededor de $f_p = 0.11$ Hz junto a la velocidad del viento, que a partir de las 18 horas ya se encuentra con valores inferiores a 6 m/s. Estas situaciones producen que el oleaje *sea* se pierda y sólo se registre *swell*. Sin embargo, la densidad energética pico se mantiene estable entre los 8 y los 4.5 m^2/Hz .

Por otro lado, la tendencia energética para el día 30 de marzo continúa siendo decreciente. La dirección del viento continúa desfasada del oleaje y su velocidad descendiendo. El viento sufre variaciones en la dirección, pasando de ser viento de componente norte a viento de componente este. La frecuencia pico continúa situada alrededor de $f_p = 0.11$ Hz, mientras que la dirección del oleaje continúa entre los 80° y los 94° .

Caracterización de los espectros en el segundo pico

Este periodo del temporal comprenderá el estudio entre las 11:00 horas del día 2 de abril del 2002 hasta las 11 horas del día 4 de abril. La clasificación espectral para este caso es la que se observa en la tabla 4.8.

Clase	Subclase	2 de marzo (desde 11:00)	3 de marzo	4 de marzo (hasta 11:00 horas)	Número total de registros
I	I-1	5			5
	I-2				
II	II-1	2	18	8	28
	II-2				
	II-3				
Total		7	18	8	33

Tabla 4.8. Clasificación del oleaje para el segundo pico de la tormenta.

Hay que destacar la presencia de oleaje *sea* (I-1) en el inicio del periodo considerado y la importancia del oleaje con espectros tipo II-1. La evolución sufrida por la densidad energética a lo largo de este segundo pico del temporal considerado se observa en la figura 4.49. Estableciendo una comparativa entre los picos de la tormenta, se observa que el primer pico del temporal tiene menor densidad de energía pico aunque su duración considerada y su altura de ola significativa máxima sean mayores que en el segundo pico.

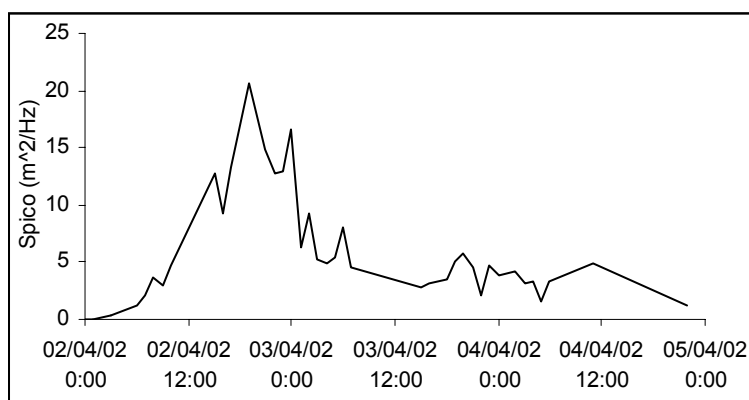


Figura 4.49. Evolución energética para la frecuencia pico.

En el periodo de inicio del segundo pico del temporal se observa una tendencia unimodal con un oleaje *sea*. El día 2 de abril empieza caracterizado por un viento creciente del noreste con valores que llegan hasta los 13.7 m/s, incrementando así el oleaje. Posteriormente la intensidad del viento decrece progresivamente a lo largo de todo el día después del pico.

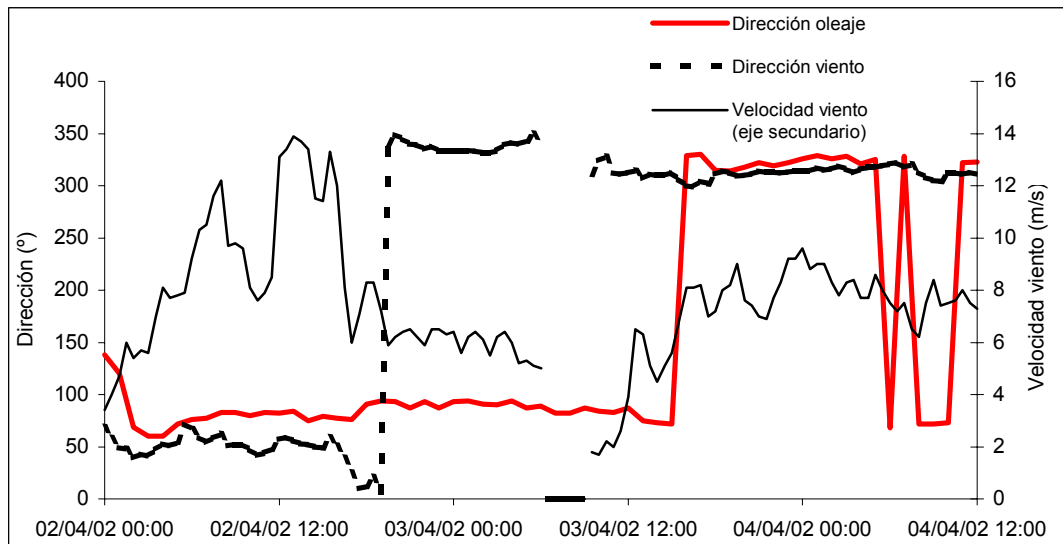


Figura 4.50. Evolución de la dirección del oleaje y velocidad y dirección del viento.

Por otro lado, la dirección del oleaje difiere con la del viento ya que el primero viene del intervalo de direcciones situado entre los 75° y los 83° (Fig. 4.50). Dada esta diferencia, es importante la cantidad de energía que deja de ceder el viento al oleaje existente. Esta diferencia entre las dos direcciones se va haciendo cada vez más grande de forma progresiva. A partir de las 16 horas la dirección del viento inicia un giro más pronunciado, aunque su velocidad desciende ligeramente.

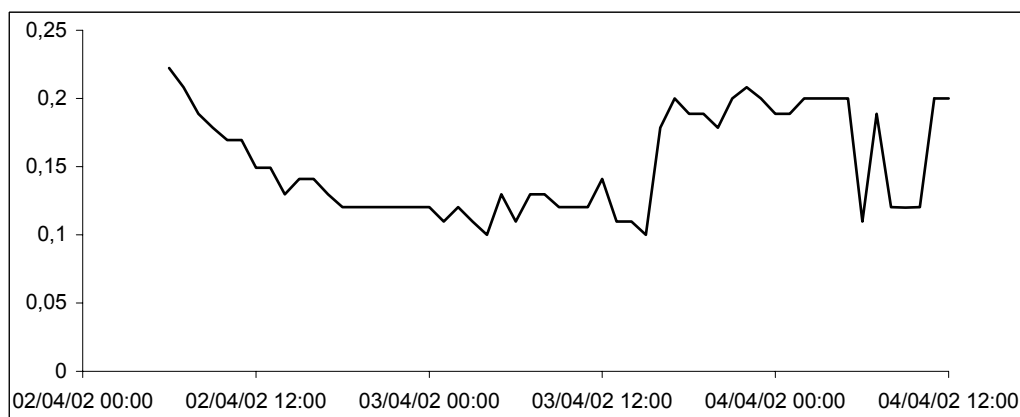


Figura 4.51. Evolución de la frecuencia pico a lo largo del segundo pico.

La frecuencia pico desciende desde valores superiores a 0.2 Hz (Fig. 4.51), hasta situarlos alrededor de 0.12 Hz. En los últimos registros del día, el giro producido por el viento produce la aparición de un oleaje *sea*, mientras que el anterior se puede considerar que está fuera de su zona de generación.

El día 3 de abril continúa con la tendencia del día anterior, tanto en las direcciones del viento como en las del oleaje (situado entre los 80° y los 90°), mientras la velocidad del viento desciende paulatinamente.

El viento creó en las últimas horas del día anterior un oleaje que continúa desarrollándose mientras que el que dominó durante todo el día anterior decrece (esta situación puede verse en el cambio de frecuencia pico de la figura 4.51). La dirección del oleaje pico se mantiene constante, entre los 80° y 90° , hasta las 15 horas momento en el cual el oleaje pico adquiere una dirección paralela a la del viento debido a que el oleaje *sea* pasa a ser el dominante.

La variación que produce en el espectro direccional el cambio de dirección del viento junto a la creación del nuevo oleaje *sea* se puede observar en la comparativa de las figuras 4.52 y 4.53.

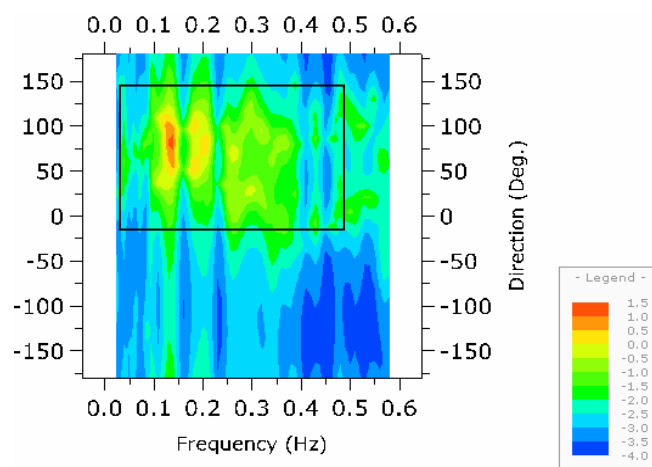


Figura. 4.52. Espectro direccional del registro de las 15:00 horas del 2/4/02.

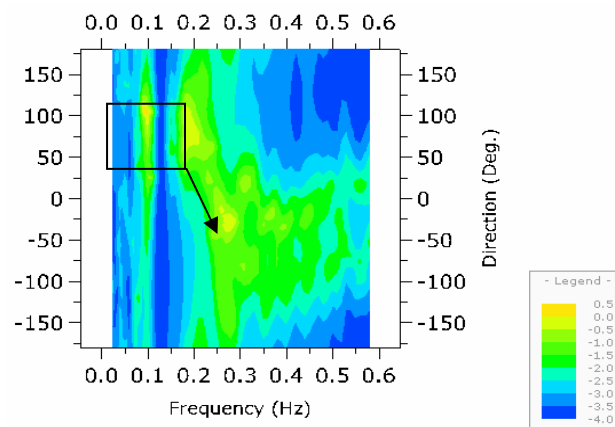


Figura. 4.53. Espectro direccional del registro de las 4:00 del 3/4/02.

En la figura 4.52 se observa la estructura del espectro direccional de un oleaje típicamente *sea*, donde la energía se distribuye, a partir de una frecuencia dos veces la frecuencia pico, aproximadamente de forma simétrica en la dirección 79° a lo largo de todas las frecuencias.

En cambio, en el gráfico 4.53 se observa que la estructura del espectro ha sufrido una variación debido a un cambio en la dirección del viento que aumenta la energía en las frecuencias más altas hacia la nueva dirección del viento.

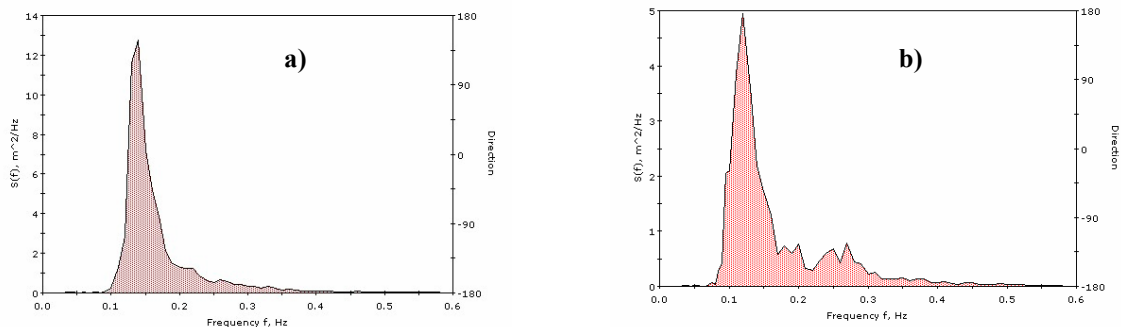


Figura 4.54. a) Espectros escalares de las 15:00 horas del 2/4/02. b) Espectro de las 4:00 del 3/4/02.

Si contrastamos los espectros de frecuencia escalares de los registros (Fig. 4.54), no podemos apreciar el cambio de dirección y ambos registros presentan una estructura similar (aunque la energía pico es superior en el primer registro considerado). Por otro lado es necesario observar que la densidad de energía espectral de las frecuencias altas que se están tratando es poca comparada con la aportación de la región alrededor del pico de tormenta pudiendo parecer al principio, que este tipo de dispersión tenga poco impacto para las aplicaciones ingenieriles, pero hay que considerar las olas con frecuencias más altas afectan a las olas más grandes debido a la tensión de transmisión de energía del viento a la ola y también por la interacción entre ellas. Su interés está relacionado con la modelización correcta del oleaje.

El día 4 de abril empieza con oleaje *sea* alineado con la dirección del viento aunque en algún registro el oleaje *swell* es el dominante. La velocidad del viento se mantiene superior a los 6 m/s. Se produce el descenso de intensidad de la energía de la tormenta, y hacia las 12:00 horas se considera el fin del temporal.

4.5.3 La edad del oleaje

En Rosas, la edad del oleaje siempre se encuentra superior a 1. El oleaje más joven se presenta durante la fase de incremento del oleaje y, simultáneamente, el viento se muestra muy variable con máximos de 8 m/s. En Blanes, al igual que en Rosas, se presenta una gran variabilidad del viento con máximos de 6 m/s provocando una gran variabilidad de la edad del oleaje mostrando siempre condiciones de mares viejos. En Tortosa se observa el mismo patrón general observado en la tormenta de noviembre: mares viejos para condiciones de calma y mares jóvenes ($U_{10}/C_p = 1$) durante los picos de la tormenta y principalmente durante el crecimiento del H_s .

Mientras la velocidad del viento es alta, la edad máxima del oleaje se sitúa en valores cercanos a 1 en frecuencias alrededor de 1. A partir de las 16 horas del día 29 de marzo, debido a la reducción de la velocidad del viento y al desfase entre las direcciones del viento y del oleaje, la edad experimenta un aumento considerable de valor (asociado a una evolución de *sea* a *swell*). Con el *swell* se produce que valores altos de la edad aparezcan en un rango amplio de frecuencias. Por ejemplo, valores de la edad superiores a 3 pueden abarcar un rango de frecuencias de 0.4 Hz. Aproximadamente, las frecuencias situadas entre 0.08 y 0.15 Hz tienen valores de la edad superiores a 1.

En el segundo pico de tormenta (Fig. 4.55) se percibe una evolución de la edad del oleaje en la que al inicio, el máximo de los registros evoluciona hacia valores altos relacionado con la evolución del *sea* hacia *swell*. Posteriormente se observa la localización de otros registros con una tendencia marcada de la transferencia de energía del viento hacia las olas, un nuevo oleaje *sea*.

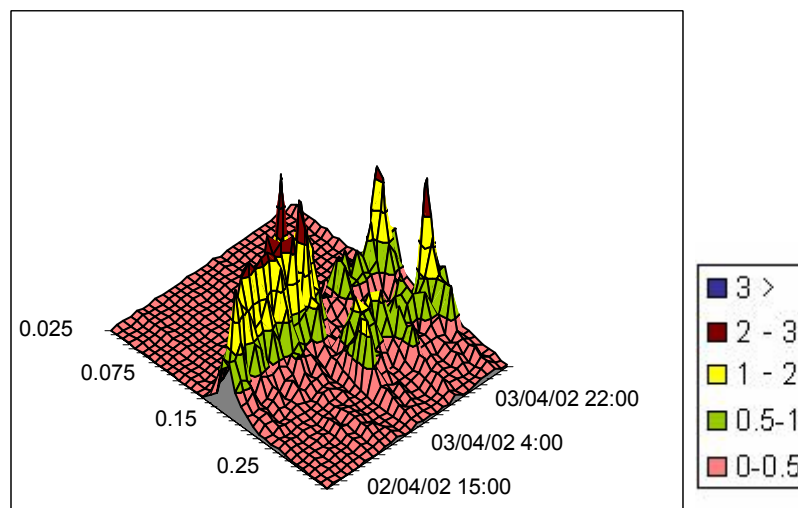


Figura 4.55. Evolución de la edad.

En el quinto periodo se observa una bimodalidad marcada en el inicio, a pesar de que la evolución conlleva a que el oleaje *swell* desaparezca y únicamente quede un débil *sea* que debido a la velocidad del viento, que raramente supera los 4 m/s, la edad aparece con valores altos en la mayoría de registros.

4.6 Caracterización de parámetros espectrales: Anchura espectral y su relación con la edad del oleaje

Anchura espectral

Es bien sabido que la anchura espectral está relacionada con el agrupamiento del oleaje. Anchuras bajas mostrarán mayor agrupamiento que aquellos mares con anchuras altas. Existen diferentes formulaciones para la determinación de la anchura espectral, siendo una de ellas el parámetro epsilon (ε). Este parámetro fue introducido por *Cartwright y Longuet-Higgins (1956)* en sus derivaciones teóricas de la distribución estadística de los máximos de la función aleatoria. El parámetro de anchura espectral ν , fue introducido por *Longuet-Higgins (1957)* para realizar análisis estadísticos de una superficie móvil, aleatoria. Más tarde, *Longuet-Higgins (1975)* presentó su versión simplificada para la distribución común de alturas de ola y periodos, utilizando ν como parámetro clave. Ambos parámetros, ε y ν , están valorados entre 0 y 1, y sirven como índice de la anchura o estrechez del espectro: se dice que el espectro es estrecho cuando los valores de estos parámetros son muy pequeños. Ambos parámetros son “directamente” proporcionales; si uno aumenta el otro también, como se observa en la figura 4.56 y 4.57.

El parámetro épsilon (ε) es una medida del ancho espectral que, al igual que otros parámetros que gobiernan las propiedades estadísticas del oleaje, es definido a partir de los momentos de los espectro de frecuencia. Los dos parámetros de anchura espectral mencionados se pueden definir de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \left[1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4} \right]^{1/2} \quad [4.3]$$

$$\nu = \left[\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \right]^{1/2} \quad [4.4]$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \quad [4.5]$$

Goda (1976) propuso otra forma alternativa para medir el ancho espectral llamado Q_p , y es definido como:

$$Q_p = \frac{2}{m_0} \int_0^\infty f [S(f)]^2 df \quad [4.6]$$

El valor de Q_p es infinito para un espectro de una única frecuencia (extremadamente de banda estrecha) y es la unidad para procesos de ruido blanco (*whitenoise* - extremadamente de banda ancha). *Rye (1977)* mostró que el parámetro Q_p , entre muchos otros parámetros propuestos para

caracterizar el ancho espectral, es el único que no es dependiente de la frecuencia de corte en la parte alta del espectro. *Goda (1976)* presentó un informe sobre los valores de Q_p para espectros de un sólo pico en la costa japonesa. Los números variaban entre 2 y 3. La relación entre ϵ y Q_p es aproximadamente inversa. Sin embargo el hecho de que Q_p dependa de $s(f)$ hace que este parámetro sea muy sensible a la variabilidad natural del muestreo. Por el contrario ϵ y ν no son afectados porque dependen linealmente de $s(f)$ (*Vledder, 1992*). Otros parámetros han sido propuestos por *Medina y Hudspeth (1987)* y *Battjes y Vledder (1984)*. *Medina y Hudspeth (1987)* analizan teóricamente la relación entre diferentes parámetros de anchura espectral y sugieren que un solo parámetro es suficiente para describir el agrupamiento del oleaje en un espectro. *Van Vledder (1992)* por otra parte, estima valores de ν para el Mar del Norte encontrando valores entre 0.15 y 0.28.

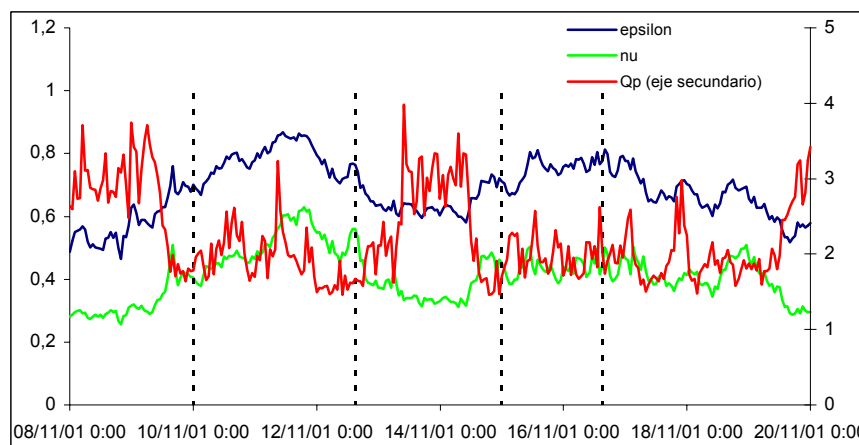


Figura 4.56. Evolución de ϵ , ν y Q_p (eje derecho) del temporal de noviembre (2001).

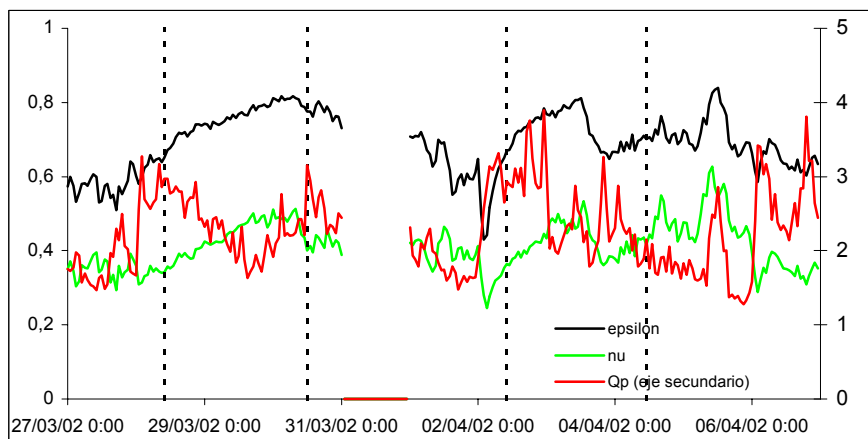


Figura 4.57. Evolución de ϵ , ν y Q_p (eje derecho) del temporal de marzo – abril (2002).

Se disponen, para los periodos a estudiar, de los valores de ϵ , ν y Q_p . Se observa que ϵ y ν presentan una tendencia paralela en ambas tormentas, y en consecuencia se decide trabajar con el primer parámetro por simplicidad. La relación que Q_p - ϵ presentan es una relación inversa, que se cumple en ambas tormentas. Por ello, y por la variabilidad del parámetro Q_p se propone tomar solamente el parámetro ϵ como representante de la anchura espectral.

El oleaje tipo *swell* presenta condiciones de oleaje regular y se define por ser de banda estrecha. Debido a eso los valores de ϵ deberían ser reducidos. En la naturaleza, el *swell* presenta valores $\epsilon \approx 0.4 \sim 0.5$. Por otro lado, el oleaje tipo *sea* es muy irregular, de banda ancha y en la naturaleza presenta valores $\epsilon \approx 0.8$ (Massel, 1996). Es de esperar que los oleajes *swell* se caractericen por un periodo pico más alto que los periodos típicos de oleaje *sea*. En tal caso, se debería esperar que cuando más grande sea el periodo, menor sea el valor de ϵ . Sin embargo, en las figuras 4.58 y 4.59 se observa que la tendencia real no es así.

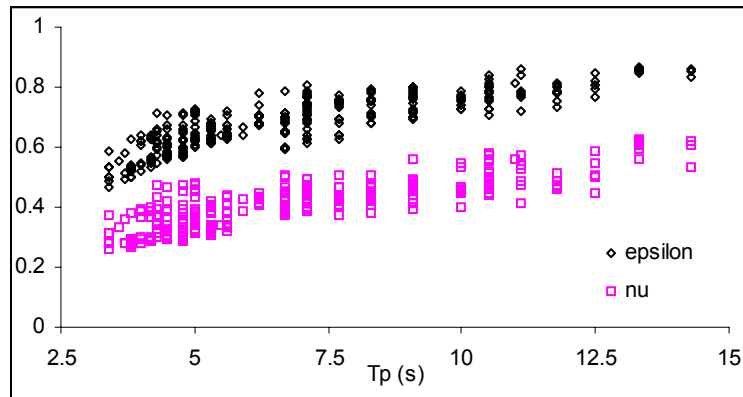


Figura 4.58. Relación de ϵ y ν con el periodo pico del espectro para la tormenta de Noviembre (2001).

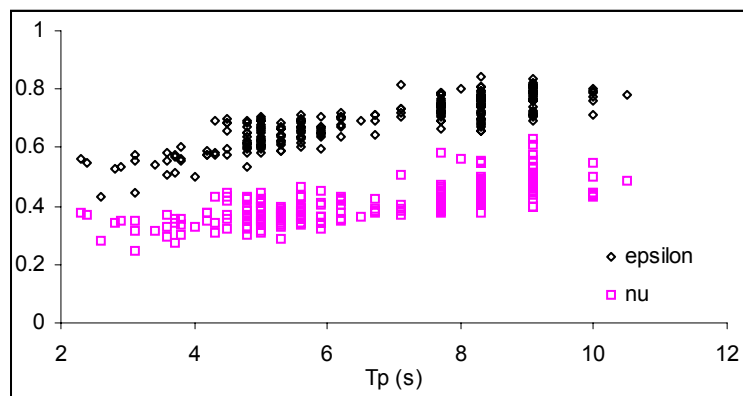


Figura 4.59. Relación de ϵ y ν con el periodo pico del espectro para la tormenta de Marzo-Abril (2002).

Evolución de la anchura espectral en la tormenta de Noviembre 2001

Para comprender el valor de ϵ no basta con obtener un simple valor que nos indique la anchura espectral. En relación al estudio aquí llevado a cabo, se han considerado diferentes situaciones en función del oleaje, alternativas a un simple oleaje *swell* o *sea*, pues se pueden producir situaciones donde coexistan diferentes oleajes, un *sea* con diferentes *swell*, donde el oleaje *sea* aporte el pico energético o bien otras situaciones donde el *swell* sea el pico. Aquí radica el interés por conocer la evolución del valor de ϵ y si dicha evolución es la esperada. ϵ

evalúa todo el espectro y es por ello que es importante conocer los valores válidos para mares compuestos.

A continuación se presenta la división (análoga a la clasificación realizada previamente) de la tormenta de noviembre en 5 subperiodos distintos. En dichos subperiodos se hace el análisis de la anchura espectral haciendo hincapié en el tipo de oleaje que se presenta. En la figura 4.60 se observa la evolución para el primer periodo. Para la primera parte de este subperiodo se observa que domina un oleaje tipo *sea* exclusivamente, y que los valores de ϵ de este oleaje se sitúan entre 0.5 y 0.65.

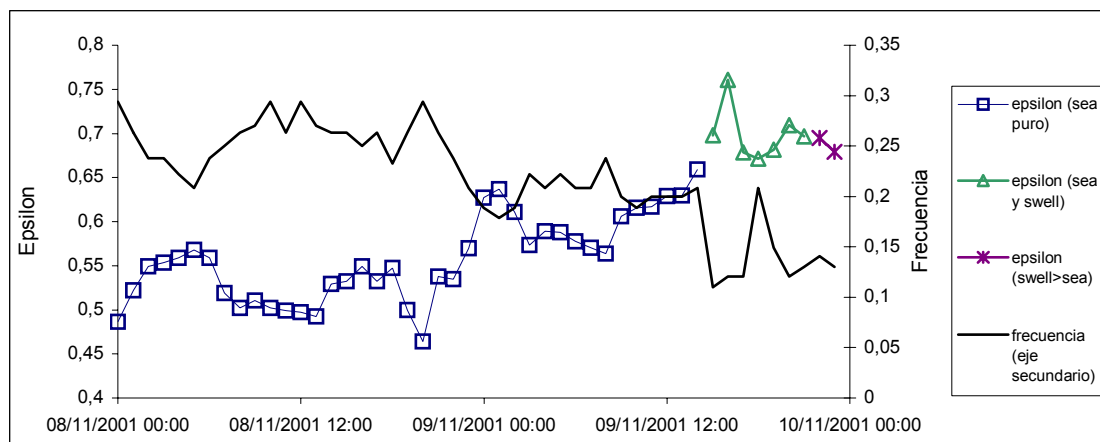


Figura 4.60. Evolución de la anchura espectral, en función del oleaje, y de la frecuencia pico.

Hacia el final de este subperiodo se puede observar la aparición de un oleaje tipo *swell*. Dada la nueva situación bimodal, con un oleaje *swell* y otro *sea*, los valores de ϵ se encuentran superiores a 0.65. Este hecho parece lógico dado que las aportaciones de ambos oleajes es parecida, la distribución espectral de la energía se produce en un rango amplio de frecuencias.

Para el segundo subperiodo, correspondiente a el primer pico, el oleaje tipo *swell* es el dominante en la mayor parte del espectro con una aportación de energía superior a la del *sea*. Por eso es de esperar que los valores de ϵ sean cercanos a 0.4 ó 0.5, debido a que toda la energía se espera concentrada alrededor de un pico únicamente (banda estrecha). La existencia de *sea* debería alterar los valores de ϵ hacía valores un poco más altos. En la figura 4.61 se presenta la evolución de la amplitud espectral y en la figura 4.62 se presenta la aportación energética del oleaje *sea* con respecto a la aportación del *swell*, para observar cual es el oleaje imperante en ese momento.

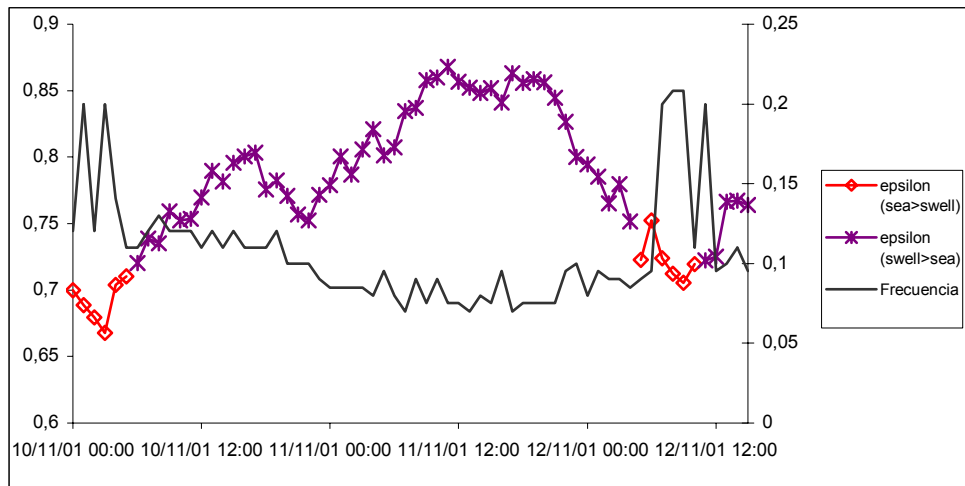


Figura 4.61. Evolución de épsilon, en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho).

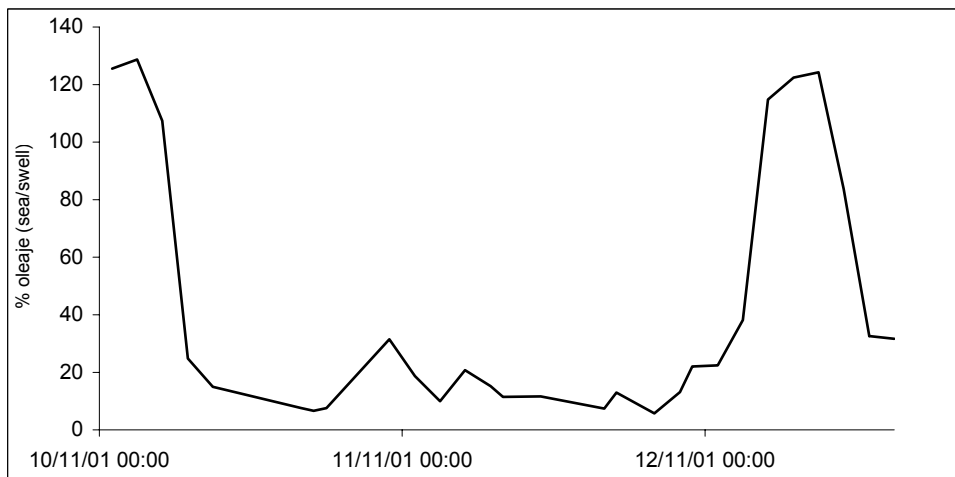


Figura 4.62. Aportación energética del oleaje *sea* con respecto a la aportación del *swell*.

Sin embargo en las figuras 4.61 y 4.62 la situación esperada no se produce, ya que para aquellos registros donde el oleaje *swell* domina con claridad se presentan valores superiores a los teóricos e incluso superiores a los esperados para uno de tipo *sea*. Estos valores están comprendidos entre 0.75 y 0.88. Por otro lado, se observa que para aquellos registros donde el oleaje *sea* es superior al *swell*, el valor de épsilon es menor al previsto situándose en valores alrededor de 0.7.

Para el tercer periodo se conoce la existencia de oleaje *sea* (dominante) y *swell*. En este caso se esperan valores de ϵ altos dado a que la energía se distribuye en un rango amplio de frecuencias y a que existe un oleaje *swell* minoritario que distribuye la energía en un rango todavía superior. La aportación energética del oleaje *swell* respecto al *sea* se observa en la figura 4.63. Si se comparan ambas, se observa que cuando el oleaje *swell* gana importancia respecto al oleaje *sea*, el parámetro de amplitud espectral se incrementa.

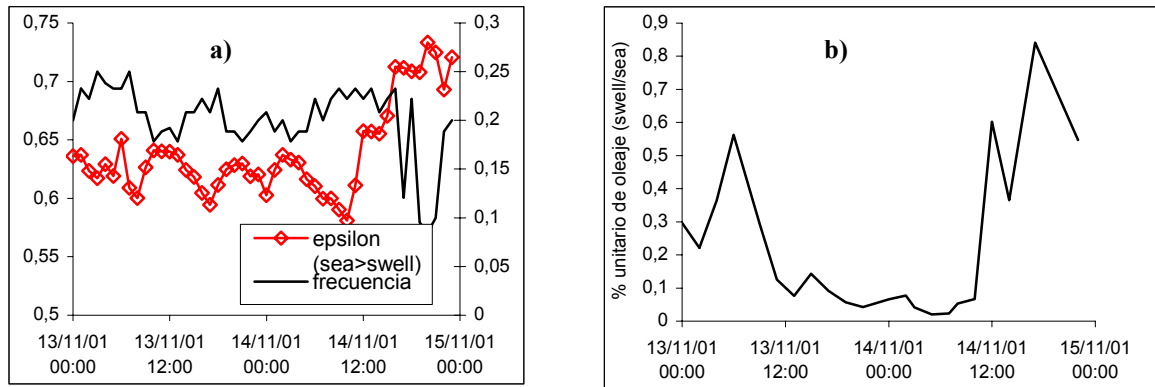


Figura 4.63. a) Evolución de ϵ , en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho)
b) Aportación energética del oleaje *sea* con respecto a la aportación del *swell*.

En la figura 4.63 se puede observar que para la bimodalidad del registro:

- *Sea* > *swell*, los valores de ϵ se sitúan entre 0.6 y 0.65
- Hacia el final del periodo, la energía del *swell* es equivalente a la energía *sea* y el valor de la anchura espectral crece considerablemente.

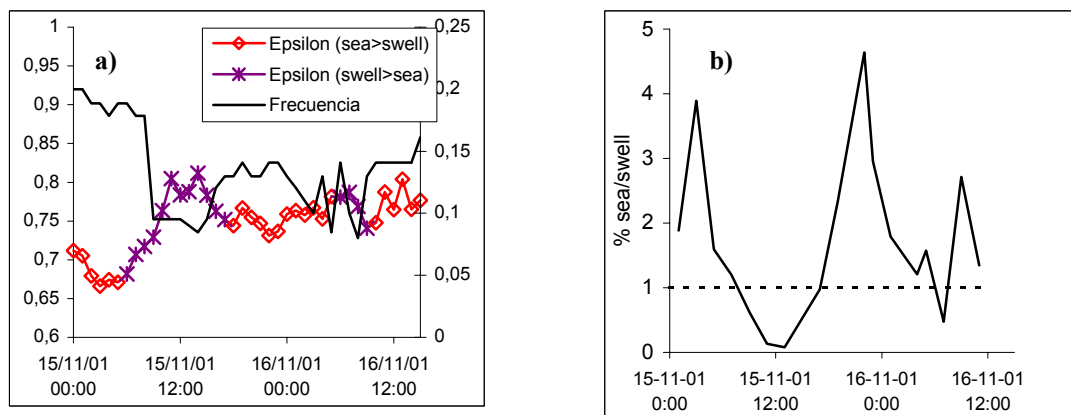


Figura 4.64. a) Evolución de ϵ , en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho).
b) Aportación energética del oleaje *sea* con respecto a la aportación *swell*.

En la figura 4.64 se puede observar que para la bimodalidad del registro:

- *sea* > *swell*, los valores de ϵ se sitúan entre 0.65 y 0.8
- *swell* > *sea* los valores se sitúan entre 0.7 y 0.85.

En el quinto periodo (Fig. 4.65), se puede observar la presencia de oleaje tipo *sea* predominante en unos registros, y en otros donde predomina el *sea* con *swell*. Se observa una clara tendencia descendente del valor de la anchura espectral. La presencia de bimodalidad en un registro modifica los valores del parámetro ϵ .

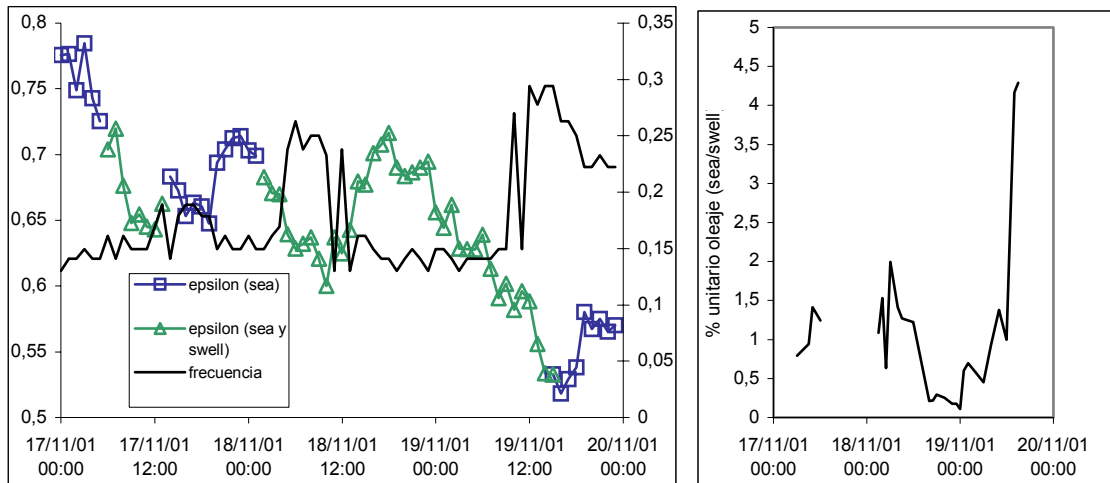


Figura 4.65. a) Evolución de ϵ , en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho). b) Aportación energética del oleaje *sea* con respecto a la aportación del *swell*.

Evolución de la anchura espectral en la tormenta de Marzo – Abril 2002

Dadas las 5 divisiones ya conocidas del periodo estudiado de Marzo-Abril, a continuación se presentara la evolución de ϵ para los diferentes casos, haciendo hincapié en el tipo de oleaje que se presenta. En la figura 4.66 se observa la evolución para el primer periodo. En dicha situación, es necesario remarcar que el oleaje dominante es de tipo *sea* y que los valores de ϵ que reporta este oleaje se sitúan entre 0.5 y 0.65, muy bajos para tratarse de un oleaje “irregular”.

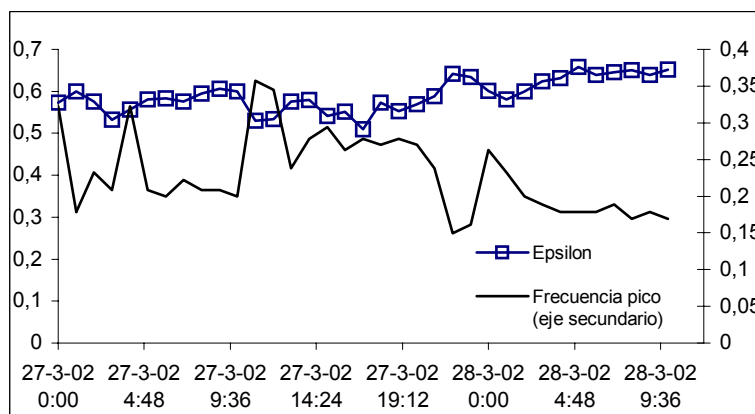


Figura 4.66. Evolución de ϵ en tiempo.

Para el segundo subperiodo, que corresponde con el primer pico, vemos la evolución en la figura 4.67. En la figura 4.68 se observa que continua la relación inversa entre la frecuencia pico y el valor de epsilon.

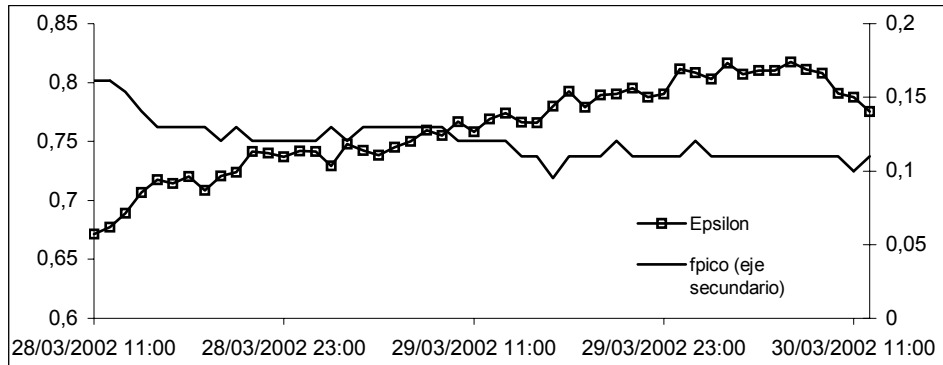


Figura 4.67. Evolución de epsilon, en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho).

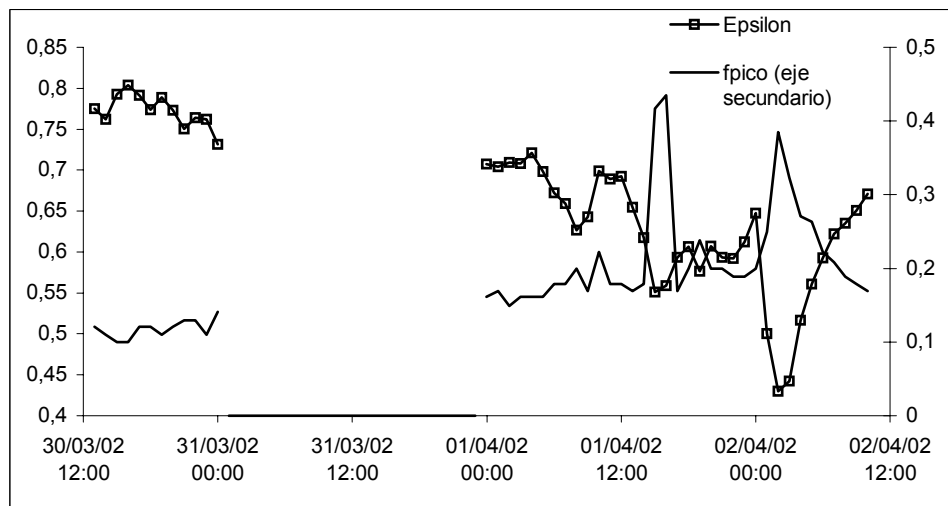


Figura 4.68. Evolución de epsilon, en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje derecho).

En el cuarto subperiodo hay un cambio de dirección del viento que produce que el oleaje que había sido *sea* en los anteriores periodos deje de serlo y el viento genere un oleaje distinto. En la figura 4.69 se distinguen tres secciones en la evolución de epsilon. El primero representa un oleaje *sea* el cual deja de ser influenciado por el viento. Se vuelve a comprobar que con *swell* dominando, el oleaje tiene una anchura espectral elevada, mientras que cuando es el *sea* quien domina al *swell*, la anchura disminuye. Esto podría explicarse por la disminución de la frecuencia pico del *sea* con su desarrollo.

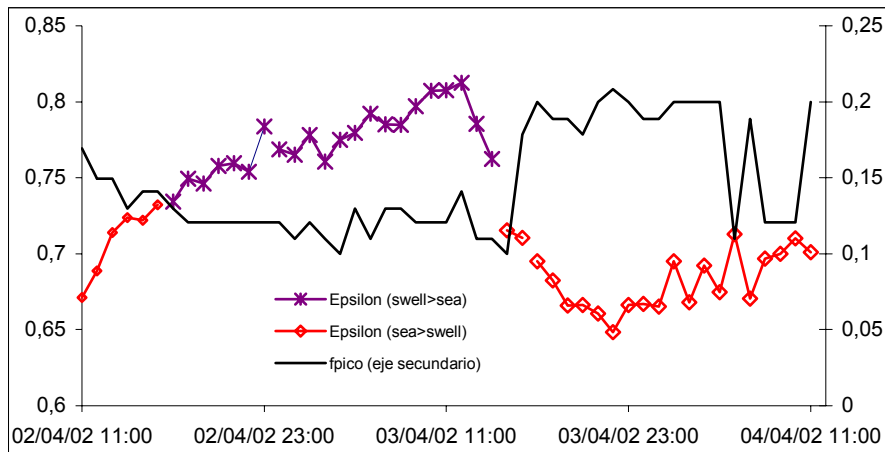


Figura 4.69 Evolución de épsilon, en función del oleaje, y de la frecuencia pico (eje secundario).

Relación edad del oleaje – anchura espectral (ϵ)

Ambos parámetros son útiles para describir el clima en un momento determinado en la costa. Dado que ambos son útiles para la descripción del oleaje, es conveniente observar la relación entre ambos para poder mejorar la caracterización del oleaje.

Debe tenerse en cuenta que el parámetro épsilon mide la anchura del espectro del oleaje, y la edad define el estado del oleaje y su relación con la transmisión de energía del viento. En la figura 4.70 se puede observar la relación entre la edad del oleaje y la anchura espectral. Dado que el objetivo aquí es destacar el carácter extremal y conocer sus relaciones, planteamos el estudio distinguiendo entre aquellos registros que pertenecen a los picos de tormenta de aquellos que no lo son. Es decir, se consideran como registros que pertenecen a los picos todos aquellos que están en los periodos:

1. Entre las 00:00 horas del 10/11/01 hasta las 15:00 horas del 12/11/01.
2. Entre las 00:00 horas del 15/11/01 hasta las 15:00 horas del 16/11/01.
3. Entre las 11:00 horas del 28/3/02 hasta las 12:00 horas del 30/3/02.
4. Entre las 11:00 horas del 2/4/02 hasta las 11:00 horas del 4/4/02.

Los registros pertenecientes a los periodos, no considerados como picos, son los inicios y finales de ambas tormentas y los periodos entre los picos de cada una de ellas.

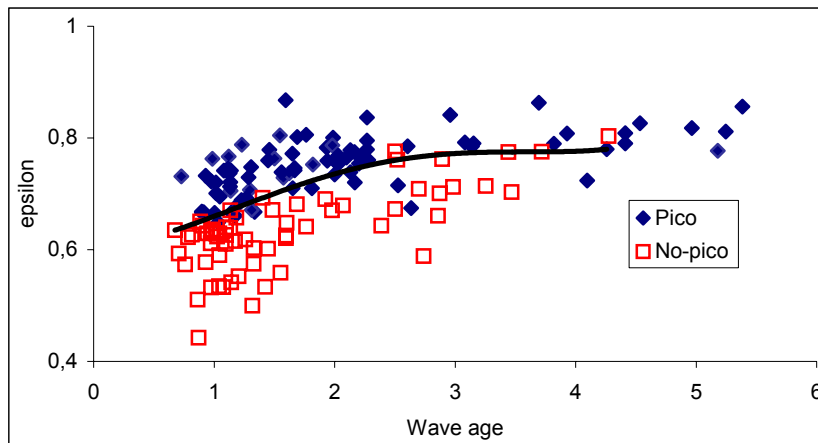


Figura 4.70. Relación épsilon con edad de oleaje distinguiendo entre los registros.

Se observó un comportamiento marcado en la relación entre la anchura espectral y la edad del oleaje, en función de si el registro pertenece a uno de los periodos pico de los temporales o no. Aquellos registros que pertenecen a los picos muestran los valores de ε más altos para una edad del oleaje determinada. La tendencia de ambas series de la figura 4.70 es que los valores de la anchura espectral es más alta para estados del mar complejos.

De la figura 4.70 se extrae una observación interesante: la distinción que se presenta entre ambas series. Existe una limitación muy clara entre aquellos registros que pertenecen a un pico y los que no. Se ha obtenido una limitación entre ambos sectores mediante la obtención de una línea de tendencia polinómica:

$$\varepsilon = -0.0152 \cdot (wa)^2 + 0.1154 \cdot (wa) + 0.5617 \quad [4.7]$$

siendo wa = la edad de oleaje o *wave age*.

Valores superiores a [4.7] indicarán que tal registro pertenece a la zona de máxima aportación energética de las tormentas. Se observa que a mayor edad se obtienen mayores anchuras espectrales, hasta un punto donde la curva muestra una tendencia a ser constante. Esta ecuación se puede utilizar de forma clara en las tormentas estudiadas, pero para poder establecer un carácter generalista de la misma, deberían realizarse estudios con otros periodos extremos y con registros procedentes de otras boyas y de otras zonas costeras.

Los espectros bimodales tienen una anchura espectral alta, mientras que la de los oleajes unimodales *sea* presentan valores más bajos. Así, se presenta una relación entre la anchura espectral y la edad del oleaje (épsilon/edad), siendo la edad corrector en función del tipo de oleaje dominante (*sea* o *swell*). De este modo, se obtiene un parámetro que nos indica la anchura espectral en función del tipo de oleaje y de la existencia de unimodalidad o multimodalidad.

En consecuencia, la relación ϵ /edad, se puede presentar en cuatro situaciones distintas:

1. Oleaje bimodal con *sea* dominante.

En la relación ϵ /edad se espera que se presenten los valores más altos para el oleaje bimodal con *sea* dominante, dado que la anchura espectral es alta y las edades son bajas, inferiores o iguales a la unidad.

2. Oleaje unimodal *sea*

Se espera que este tipo de oleaje presente una relación anchura espectral/edad alta, aunque inferior a la situación número 1 debido a que los valores de ϵ son altos a pesar de ser un poco inferiores a los de un oleaje bimodal y la edad sea menor o similar a 1.

3. Oleaje bimodal con *swell* dominante

Es de esperar que la relación ϵ /edad para este oleaje presente valores bajos: aunque los valores de ϵ son altos, los valores de la edad también deben serlo, siendo superiores a 1.5 o 2.

4. Oleaje unimodal *swell*

Para este oleaje deben presentarse los valores más bajos ya que los valores de ϵ deben ser bajos y los valores de la edad deben ser altos.

Se ha obtenido la relación ϵ /edad a lo largo del estudio de las dos tormentas estudiadas. Para observar la relación, se han diferenciado los valores en función al tipo de oleaje al cual pertenecen. Con la ayuda de las figuras 4.71 y 4.72, se observa el agrupamiento y separación de las diferentes condiciones.

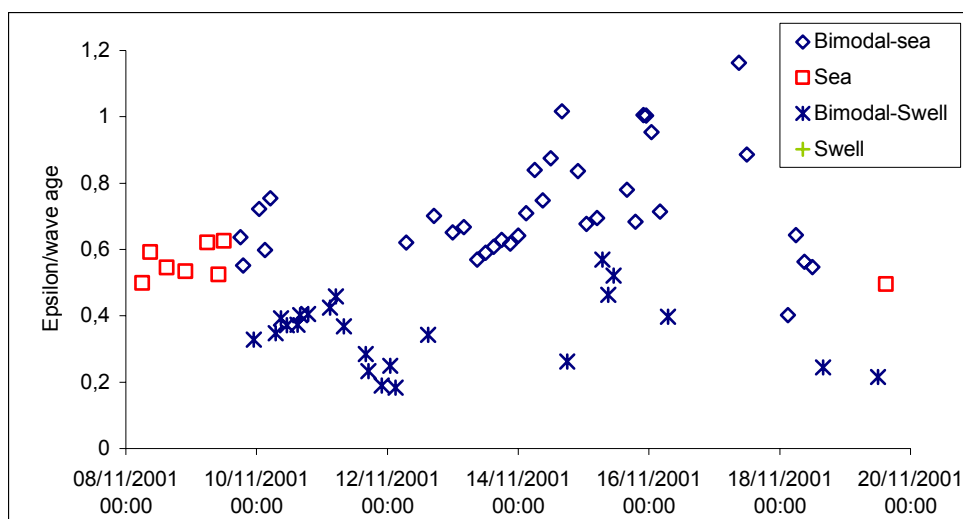


Figura 4.71. Relación ϵ /edad para la primera tormenta (noviembre 2001).

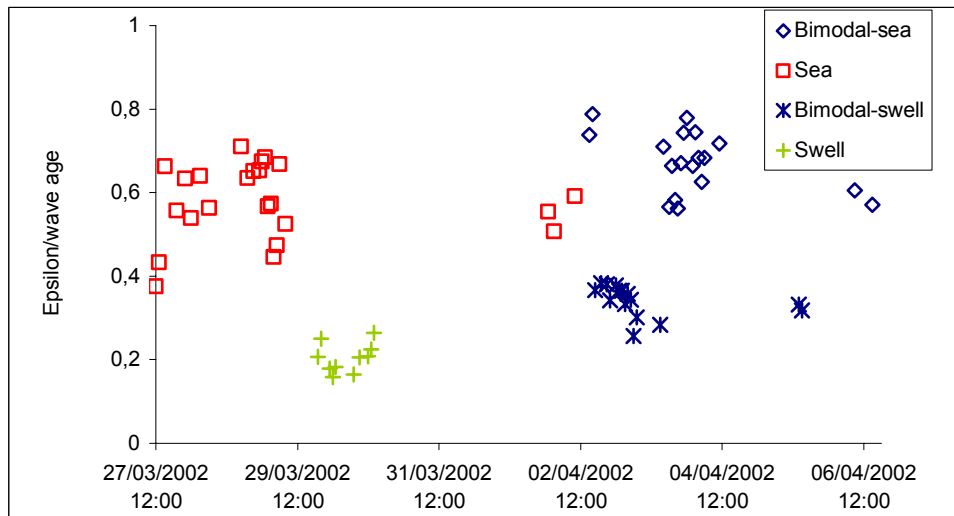


Figura 4.72. Relación ϵ /edad para la segunda tormenta (marzo – abril 2002).

Los valores que se obtienen para el parámetro establecido de relación anchura espectral-edad en función del tipo de oleaje son los de la tabla 4.9:

Tipo de oleaje	ϵ	ϵ /Edad
Bimodal con oleaje <i>sea</i> dominante	0.53 – 0.76	0.55 – 1.16
Unimodal, tipo <i>sea</i>	0.43 – 0.78	0.38 – 0.70
Bimodal con oleaje <i>swell</i> dominante	0.67 – 0.87	0.26 – 0.38
Unimodal tipo <i>swell</i>	0.77 – 0.82	0.16 – 0.26

Tabla 4.9. Valores de la relación ϵ /edad en función del tipo de oleaje.

El nuevo parámetro planteado nos proporciona valores altos para oleajes de *sea* dominante, y menores para oleajes *swell*. Así esta relación se adecua a la teoría de la anchura espectral (para oleajes *swell* ϵ alrededor de 0.4 y para oleajes *sea* alrededor de 0.8), además de que este parámetro también proporciona una distinción en función de si se presenta bimodalidad o no.

Este parámetro permitirá mejorar el conocimiento del oleaje en el Mediterráneo noroccidental. En la sección 5.3 se plantea el uso de la anchura espectral como parámetro dentro de la formulación de aporte de viento de Komen en el modelo SWAN. Se mostrará la predicción de este parámetro y se propondrá una metodología para su incorporación.

4.7 Validación de los Modelos MASS y ARPEGE para las tormentas de Noviembre 2001 y Marzo-Abril 2002

Como ya se ha mencionado en secciones anteriores, los modelos de predicción de oleaje son forzados por campos de vientos que comúnmente provienen a su vez de modelos atmosféricos. Es por esto que al evaluar los modelos de oleaje es necesario que se tomen en cuenta los errores que podrían provenir de los campos de viento.

Los campos de viento de tormentas son de interés tanto científico para comprender las interacciones entre el viento y el oleaje, como práctico desde el punto de vista de la navegación y riesgos costeros. Una tormenta intensa puede producir vientos muy variables y generar un campo de oleaje muy complejo con variaciones espaciales y temporales (*Moon et al., 2003*).

Para validar el modelo MASS y ARPEGE se realizaron comparaciones entre las predicciones y las mediciones de estaciones meteorológicas costeras. La tabla 4.10 muestra las coordenadas de las estaciones meteorológicas y la boya más próxima. Hay que mencionar que los modelos de oleaje no utilizan el viento sobre tierra, por lo que la validación de los campos de viento a partir de estaciones costeras es meramente orientativa. Datos sobre el mar deben de ser utilizados (satélite, boyas con estación meteorológica, plataformas petrolíferas) para dar una mayor validez a la determinación de errores del modelado de viento y sus implicaciones en la predicción del oleaje.

Estación	Latitud	Longitud	Boya cercana	Distancia de estación a costa
Illa de Buda	40.709	0.835	Tortosa	2.5 km
Barcelona (Ciutadella)	41.391	2.182	Llobregat	1.3 km
Begur	41.960	3.2135	Rosas	1.3 km
El Perrelló	40.874	0.716	Tortosa	4.3 km
Lloret de Mar	41.725	2.843	Blanes	2.5 km
Rosas	42.272	3.183	Rosas	1 km

Tabla 4.10. Características de estaciones meteorológicas.

La figura 4.1 (sección 4.2) muestra la posición de las boyas y de las estaciones meteorológicas. Las estadísticas de validación se realizaron aplicando dos métodos: realizando interpolación espacial-lineal o tomando el punto más cercano correspondiente al MASS. Respecto a la estación, se realizaron comparaciones utilizando los valores instantáneos, la media centrada o las medias de 6 o 3 horas anteriores y posteriores. Esto se realizó para la velocidad del viento y la dirección en ambas mallas (gruesa y media). Para el caso del ARPEGE, los resultados del modelo fueron proporcionados cada 3 horas con una resolución espacial de 0.25° (27 km aproximadamente) y con datos de viento (velocidad y dirección) exclusivamente sobre el mar, por lo que para realizar la interpolación, sólo se tomaron en cuenta los puntos más cercanos a las estaciones sobre el mar.

Para estudiar la variabilidad temporal dentro del modelo, se realizaron las validaciones utilizando los resultados cada tres horas (tipo malla anidada del MASS) y cada seis horas (tipo malla gruesa del MASS). A continuación, se describe la predicción y las estadísticas de las tormentas.

4.7.1 Tormenta de Noviembre 2001

Las diferencias de precisión utilizando la interpolación o el punto cercano puede explicarse por los procesos físicos locales. Dependiendo de la posición de cada punto del MASS, puede ocurrir que el punto más cercano describa mejor la física de la estación y que la utilización de una interpolación sólo sesgue los resultados por características locales que no afectan a la estación meteorológica. Esta observación es válida para las diferentes mallas y posiciones, tanto para estaciones meteorológicas, como para las boyas. El uso de las diferentes medias temporales de la estación no mostró diferencias significativas, por lo que aquí se utiliza para todos los casos la media centrada, ya sea de 6 horas para el caso de la malla gruesa o de 3 horas para la malla anidada. En general, las diferencias entre las medias de 6 y 3 horas fueron relativamente pocas, mostrando siempre, como era esperado, mayor variabilidad para la serie de tiempo de medias cada 3 horas.

La tabla 4.11 muestra el resumen estadístico para la tormenta de noviembre utilizando el MASS. Se observa que en 3 estaciones (Illa de Buda, Begur y Rosas) la malla media presenta mayores errores respecto a las observaciones por la estación meteorológica. La mejor predicción fue para el Perelló en la malla anidada, la peor en cambio, fue para Begur en la malla anidada, donde una gran sobrestimación de la serie de tiempo produjo elevados errores.

La tabla 4.12 muestra los errores obtenidos por el modelo ARPEGE. Al no tener valores sobre tierra, las diferencias entre utilizar el punto más próximo o la interpolación es mínima. Las diferencias al tomar resultados cada 3 ó 6 horas también son mínimas mostrando ligeramente menores errores con la serie de 6 horas. Para las posiciones de Illa de Buda, Barcelona y Rosas el modelo muestra menores errores que el MASS. Begur es la única posición donde se dan mayores errores que el MASS. Estas comparaciones únicamente dan una evaluación parcial ya que las condiciones de viento sobre la costa, la ausencia de viento para el ARPEGE sobre tierra y las escalas espaciales utilizadas son limitantes para una validación rigurosa. Por ello, también es importante analizar las implicaciones que tienen estas diferencias en los campos de viento para la predicción de oleaje dentro del Mediterráneo noroccidental.

Estación	Malla	Interpolación espacial	Bias	Error absoluto	RMSE	SI
Illa de Buda	Gruesa	Interpolación	4.4	4.9	5.6	0.9
	Anidada	Punto más cercano	6.03	6.1	6.9	1.1
Barcelona (Ciutadella)	Gruesa	Interpolación	3.9	4.1	4.8	1.3
	Anidada	Punto más cercano	3.1	3.3	4.0	1.1
Begur	Gruesa	Punto más cercano	-0.9	5.2	7.2	0.6
	Anidada	Interpolación	5.8	9.2	10.3	0.8
El Perello	Gruesa	Punto más cercano	-3.2	3.5	4.1	0.3
	Anidada	Interpolación	0.06	2.2	2.9	0.2
Rosas	Gruesa	Interpolación	3.6	3.7	4.3	0.6
	Anidada	Interpolación	7.2	7.2	7.9	1.0

Tabla 4.11. Resumen de análisis de validación de velocidad del viento para la tormenta de noviembre 2001 utilizando el MASS.

Estación	Malla	Bias	Error absoluto	RMSE	SI
Illa de Buda	Gruesa	2.5	3.0	3.5	0.5
Barcelona (Ciutadella)	Gruesa	-0.3	1.4	1.8	0.4
Begur	Gruesa	3.2	6.7	8.2	0.7
Rosas	Gruesa	5.4	5.6	6.5	0.9

Tabla 4.12. Resumen de validación del viento para la tormenta de noviembre utilizando el modelo ARPEGE.

Las figuras 4.73 – 4.75 muestran ejemplos de las series de tiempo de la tormenta de noviembre obtenidos de los modelos y las estaciones meteorológicas, tanto para la velocidad de viento, como para la dirección.

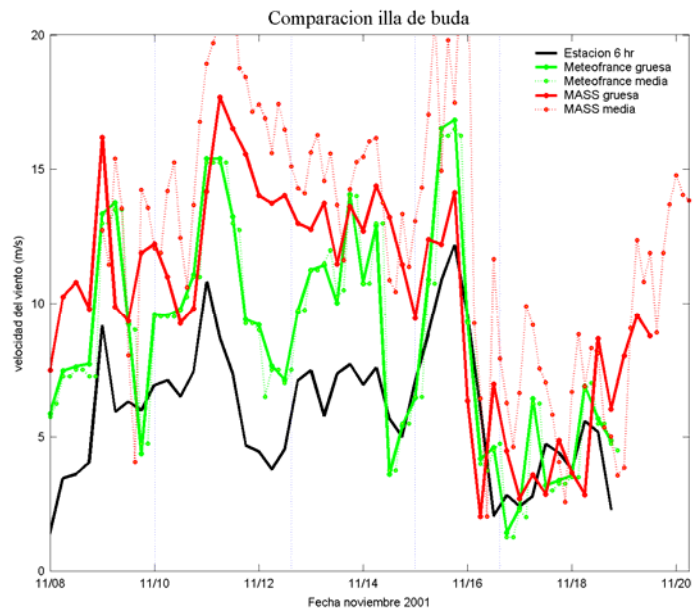


Figura 4.73. Velocidad del viento medida y la prevista para la posición de Illa de Buda.

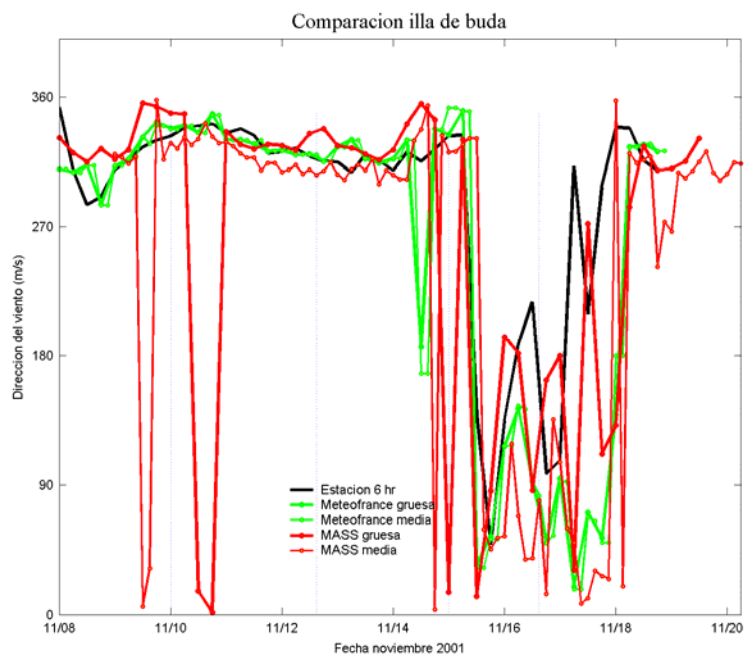


Figura 4.74. Dirección del viento medida y la prevista para la posición de Illa de Buda.

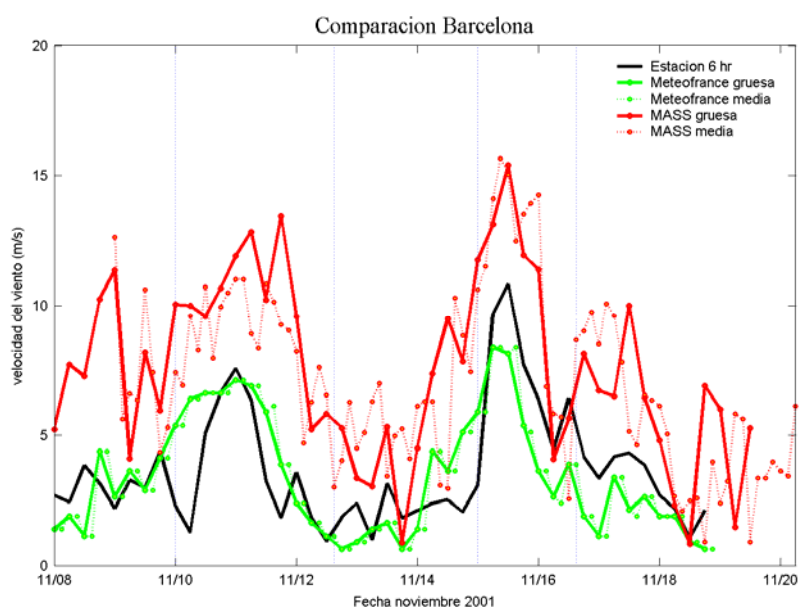


Figura 4.75. Velocidad del viento medida y la prevista para la posición de la Ciutadella.

4.7.2 Tormenta de Marzo – Abril 2002

La tabla 4.13 muestra las estadísticas para la velocidad de viento. Se observa la tendencia de los modelos a sobrestimar la velocidad del viento con errores absolutos entre 3 y 5 metros por segundo. La malla anidada mostró mayores errores y mayor dispersión. El modelo ARPEGE muestra menores errores que el MASS para todas las estaciones.

Estación	Malla	Interpolación espacial	Bias	Error absoluto	RMSE	SI
Illa de buda	Gruesa	Interpolación	3.0	3.6	4.3	0.8
	Anidada	Punto más cercano	4.2	4.6	6.0	1.1
Barcelona (Ciutadella)	Gruesa	Interpolación	2.4	2.4	2.6	0.8
	Anidada	Punto más cercano	4.1	4.1	4.8	1.3
Begur	Gruesa	Punto más cercano	2.4	2.4	2.6	0.7
	Anidada	Interpolación	3.9	4.3	5.3	1.0
Rosas	Gruesa	Interpolación	3.8	3.8	4.2	1.4
	Anidada	Interpolación	4.1	4.1	4.6	1.6

Tabla 4.13. Resumen estadístico para la tormenta de Marzo-Abril 2001 con el MASS.

Estación	Malla	Bias	Error absoluto	RMSE	SI
Illa de Buda	Gruesa	0.9	4	5.0	1.0
Barcelona (Ciudadella)	Gruesa	-1.2	1.9	2.4	0.7
Begur	Gruesa	-0.1	2.3	2.7	0.5
Rosas	Gruesa	2.6	3.0	4.3	4.4

Tabla 4.14. Resumen estadístico para el modelo ARPEGE.

La figura 4.76 muestra la serie de tiempo de velocidad de viento medida y la prevista en la estación de Barcelona la Ciudadella. Se observan las diferencias entre los modelos y entre las mallas del MASS.

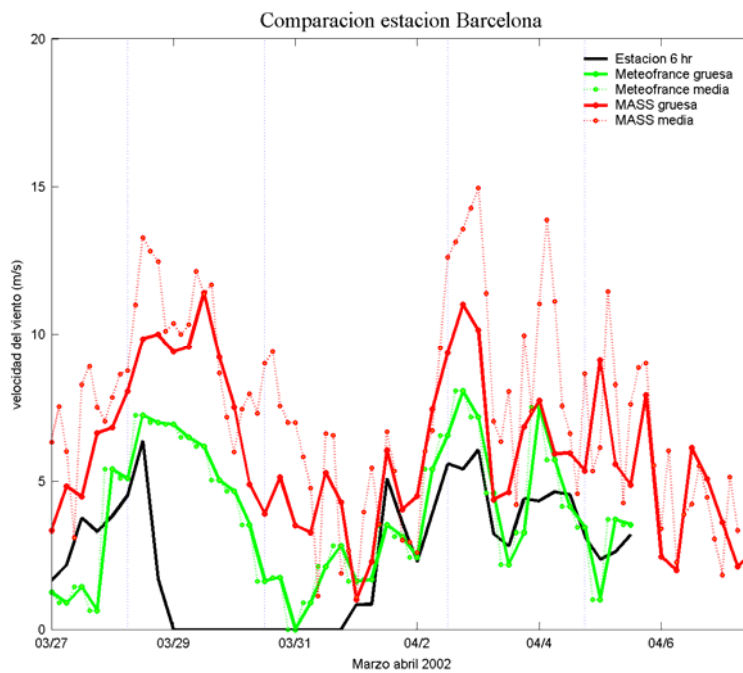


Figura 4.76. Velocidad del viento medida y la prevista para la posición de Barcelona (La Ciudadella).

4.7.3 Descripción espacial de los campos de viento

En esta sección se hace una breve descripción de las distribuciones espaciales que en el capítulo 5 serán discutidas con más detalle (tanto las distribuciones de viento, como de oleaje).

Para la tormenta de Noviembre, y en la mayoría de los casos, el modelo ARPEGE mostró valores más altos que el MASS sobre el Mediterráneo, a pesar de que cerca de la costa ocurre lo contrario, como se ha mostrado en la validación de los modelos con estaciones meteorológicas. Esto puede tener importantes implicaciones al analizar los resultados de los modelos de oleaje y muestra que la validación exclusivamente con estaciones costeras no es suficiente. Los patrones de dirección son muy similares entre ambos modelos, aunque en algunas fechas el ARPEGE muestra el centro de bajas presiones (día 12, 6:00 y 15, 16:00) más definido. En el primer pico de la tormenta, el MASS presenta valores ligeramente superiores al ARPEGE.

Resulta interesante que para la tormenta de Marzo-Abril ocurra lo contrario, observándose velocidades menores sobre el Mediterráneo con el modelo ARPEGE. Especialmente, se observan grandes diferencias durante los días 4 y 5 de abril, donde las distribuciones de velocidades y direcciones son considerablemente diferentes.