

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS  
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE

---

TESIS DOCTORAL

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DEL RECURSO  
SURF: METODOLOGÍA Y RESULTADOS

---

Presentada por: ANTONIO ESPEJO HERMOSA

Dirigida por: IÑIGO J. LOSADA RODRIGUEZ  
FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA

Junio 2011

## CAPITULO 8

ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE SURF

MEDIANTE TIPOS DE TIEMPO



## 8.1. Introducción

En capítulos anteriores se ha estudiado el recurso surf mediante un análisis estadístico de las variables más relevantes (altura de ola, período, viento, etc.) de forma independiente e integrada (a través de índices). El análisis se ha centrado en el estudio de las series históricas de las variables, es decir, un estudio histórico del recurso. Sin embargo, la variabilidad observada en el surf, al igual que en los fenómenos meteorológicos, tiene su origen en los cambios en el estado de la atmósfera, o dicho de otra forma, las alteraciones en las condiciones de surf son un efecto de las alteraciones en la variabilidad de la atmósfera. Esto es debido a que las condiciones de surf dependen fundamentalmente del oleaje y el viento, los cuales son procesos derivados de la circulación atmosférica. Teniendo en cuenta esto, parece interesante estudiar y describir los cambios en la variabilidad de la atmósfera con el objetivo de entender mejor la compleja interrelación que existe entre determinados forzamientos climáticos y sus posibles efectos en la escala local y regional (Ansell *et al.*, 2009).

Aunque las situaciones atmosféricas nunca se repiten exactamente, se pueden encontrar características similares en mapas sinópticos atmosféricos de un largo período de tiempo. Los tipos de tiempo (TT) son situaciones sinópticas generalizadas obtenidas a partir de la clasificación de patrones atmosféricos típicos en un determinado dominio (Lamb, 1972). Los TT son ampliamente usados en aplicaciones meteorológicas e investigaciones climáticas (Bermejo y Ansell, 2009). Por lo tanto, para analizar el comportamiento de la atmósfera y su relación con el recurso surf, se plantea el uso del concepto de tipos de tiempo.

El análisis del recurso surf a partir de tipos de tiempo permite abordar el estudio a distintas escalas espaciales y temporales. En lo que se refiere a la escala espacial, se puede estudiar el recurso de forma regional (considerando una amplia zona) o de forma local, estudiando con detalle las condiciones del recurso surf en un punto concreto. Respecto a la escala temporal, este enfoque permite, además del estudio del recurso a largo y muy largo plazo (proyecciones), establecer las bases para un estudio operacional, abarcando la escala del corto (3 días) y medio plazo (previsiones estacionales).

## 8.2. Zona de estudio y datos utilizados

El análisis propuesto se va a llevar a cabo de forma regional en las inmediaciones de Santander y de manera local en el *spot* de Mundaka (figura 8.1). El objetivo es identificar que estados de la atmósfera, o tipos de tiempo, generan mejores condiciones de surf y su probabilidad de ocurrencia, para la evaluación del recurso en las zonas propuestas.

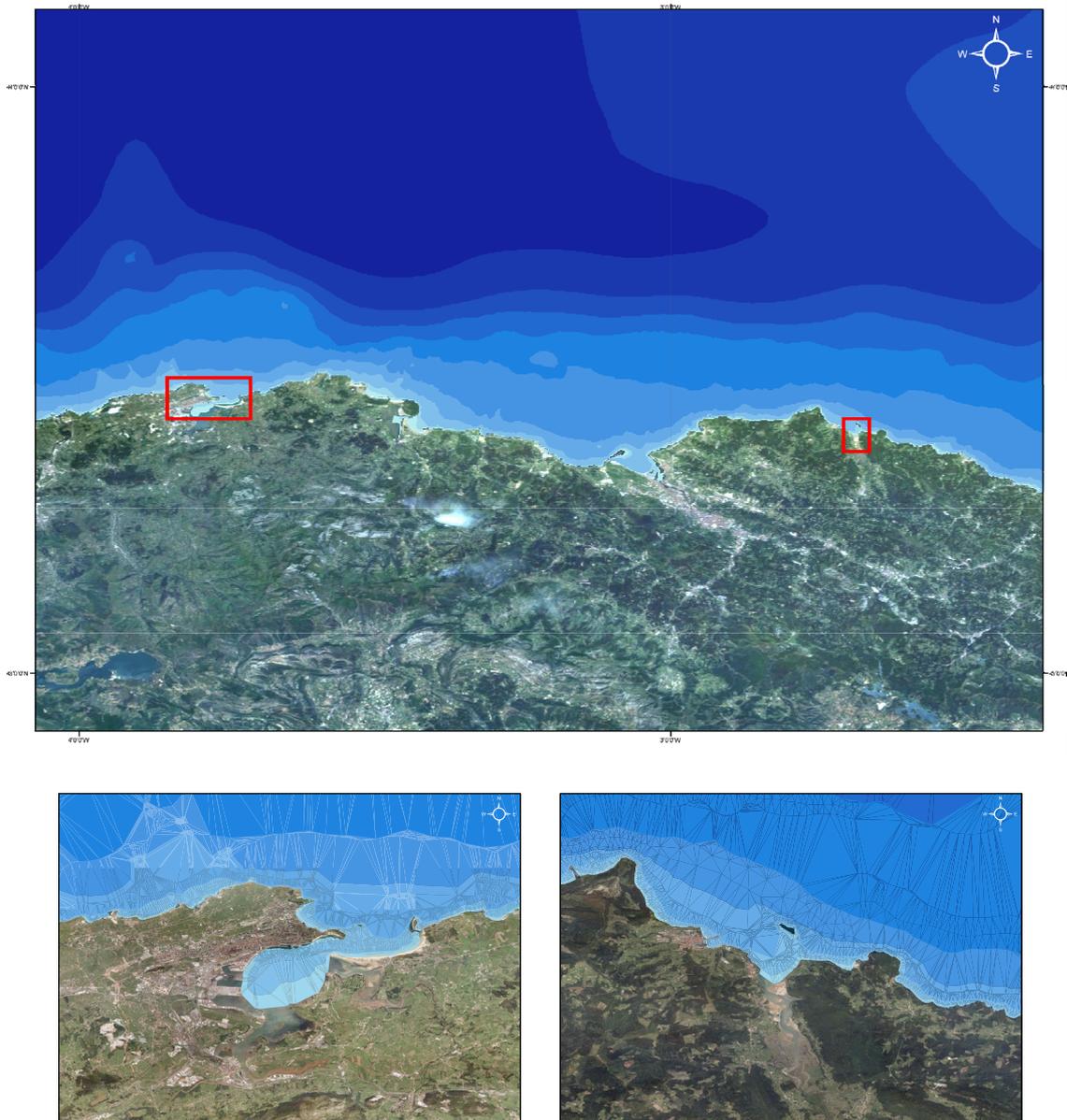


Figura 8.1. Localización de las zonas de estudio en el Mar Cantábrico (panel superior). Área de Santander (panel inferior izquierdo) y *spot* de Mundaka (panel inferior derecho)

### 8.2.1. Datos atmosféricos

La localización de la zona de estudio y la variable principal de la que depende el recurso surf (oleaje) establecen de forma directa el dominio de los tipos de tiempo. El oleaje en un determinado punto de estudio está vinculado a la evolución de las condiciones atmosféricas en una amplia zona, la cual dependerá del tamaño y características de la cuenca en la que se sitúe el punto de estudio y de la zona de generación del oleaje. En este caso, la zona de estudio se sitúa en el Mar Cantábrico, el cual está dominado por oleajes procedentes del Atlántico Norte. El área de influencia propuesta para el estudio de tipos de tiempo se muestra en la figura 8.2 y coincide con el área de influencia de la NAO, que como se explicó con anterioridad es un modo dominante de variabilidad en el Atlántico Norte.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que el oleaje está vinculado a la generación y propagación de una borrasca. Dependiendo de la zona de estudio la independencia entre situaciones de oleaje asociados a borrascas será diferente. Por ejemplo, en el Mar Mediterráneo la independencia entre temporales puede fijarse en un día (debido a las características locales y dimensiones del mar), en el Atlántico Norte se suele utilizar los 3 días y en el Pacífico podrían utilizarse hasta 5 u 8 días (Alves, 2006). En este caso, en base a la experiencia en el estudio de la zona, se consideran 3 días de independencia entre situaciones de oleaje en el Atlántico Norte (Luceño et al., 2006; Camus, 2009; Izaguirre, 2010).

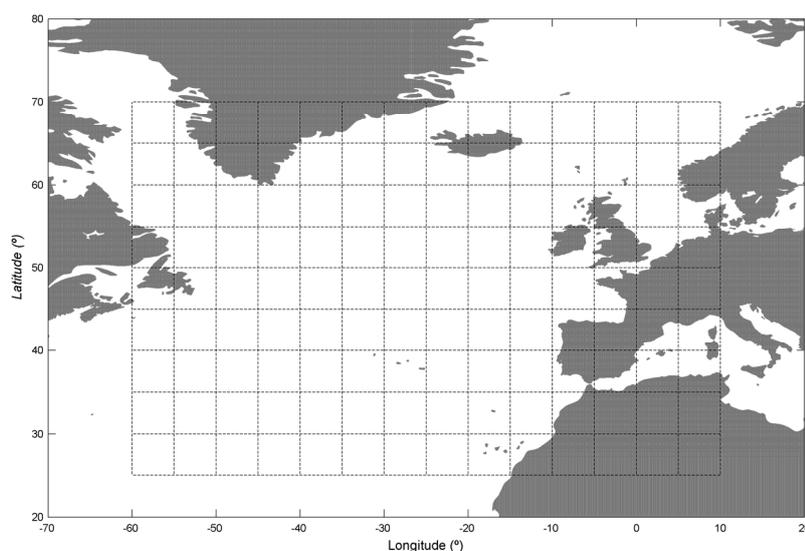


Figura 8.2. Área de influencia del Atlántico Norte

Teniendo en cuenta las consideraciones espaciales y temporales descritas, los datos utilizados para el análisis de los tipos de tiempo son los campos de presiones a nivel del mar (SLP) procedentes del reanálisis global atmosférico NCEP/NCAR *Reanalysis Project* (Kalnay et al., 1996) realizado por el *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Este reanálisis proporciona datos del estado de la atmósfera cada 6 horas y cubre el período de tiempo desde 1948 hasta la actualidad. La resolución espacial es de 2.5°.

Puesto que el oleaje está generado por el viento que sopla sobre la superficie del mar y éste depende a su vez del gradiente de presión, la obtención de los tipos de tiempo se ha llevado a cabo a partir de los campos del gradiente espacial de presión. Utilizando la escala temporal de estudio, que se ha fijado en los 3 días, se han obtenido los campos de gradiente espacial de presiones medios 3-diaros en el área de influencia especificada.

### 8.2.2. Datos correspondientes al recurso surf

Se dispone de las series históricas del RSI en 700 puntos en profundidades reducidas a lo largo de la costa de la zona de estudio. Los valores del índice se han obtenido mediante la metodología explicada en el Capítulo 7.

## 8.3. Clasificación de la atmósfera

En este estudio se pretende analizar el comportamiento de la atmósfera a escala 3-diaría. Para obtener los correspondientes tipos de tiempo es necesario utilizar algoritmos capaces de distinguir situaciones meteorológicas definidas por los campos de presiones. Existen diferentes estrategias de clasificación de los estados de la atmósfera como por ejemplo las redes neuronales (Gutiérrez et al., 2004) o las redes Bayesianas (Ansell y Gutiérrez 2008). De entre los existentes, se han realizado pruebas con redes auto-organizativas y la técnica *k*-medias, obteniendo mejores resultados para este último método, por lo que ha sido el escogido para realizar la clasificación. Sin embargo, antes de proceder a la clasificación, se ha reducido la dimensionalidad del problema aplicando la técnica de Componentes Principales, de manera que se pueda manejar la información de manera más eficiente. La clasificación se ha hecho con 10 dimensiones (10 primeros modos), las cuales conservan el 92.73 % de la varianza. En la

figura 8.3 se muestran, a modo de ejemplo, los seis primeros modos espaciales obtenidos para el área del Atlántico Norte y en la figura 8.4 los correspondientes modos temporales (o amplitudes).

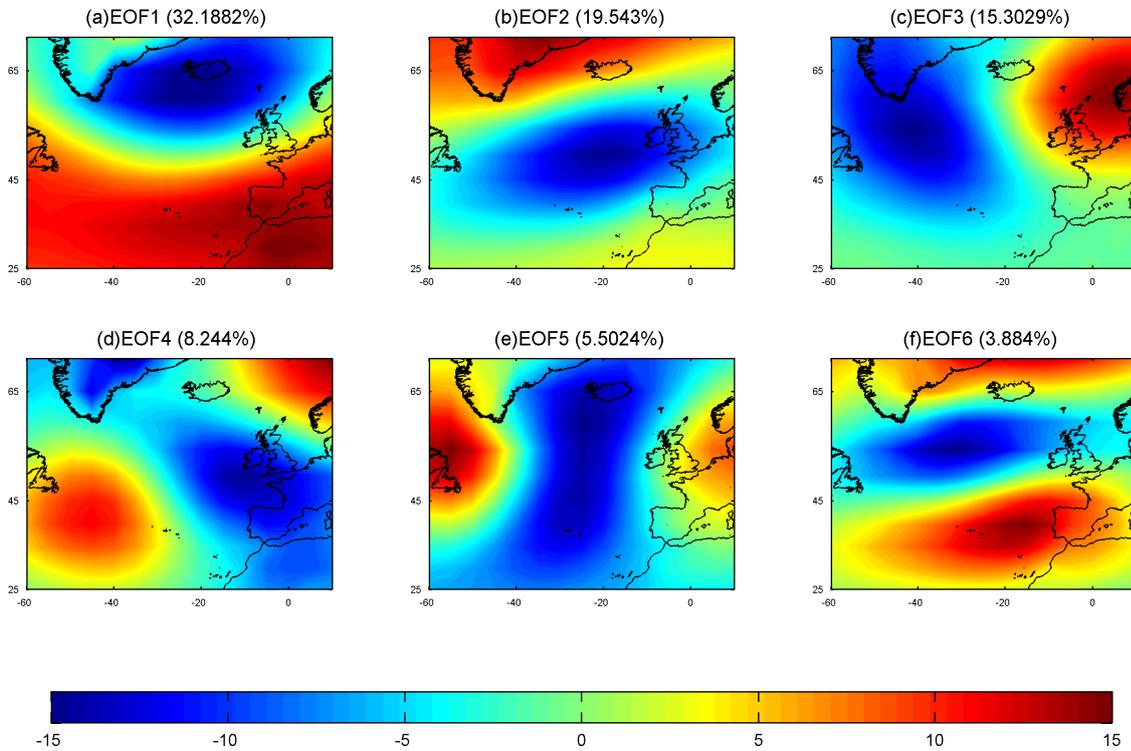


Figura 8.3. Primeros 6 EOF correspondientes a los gradientes de presiones medios 3-diaros en el área geográfica del Atlántico Norte (anomalías de presión, mb)

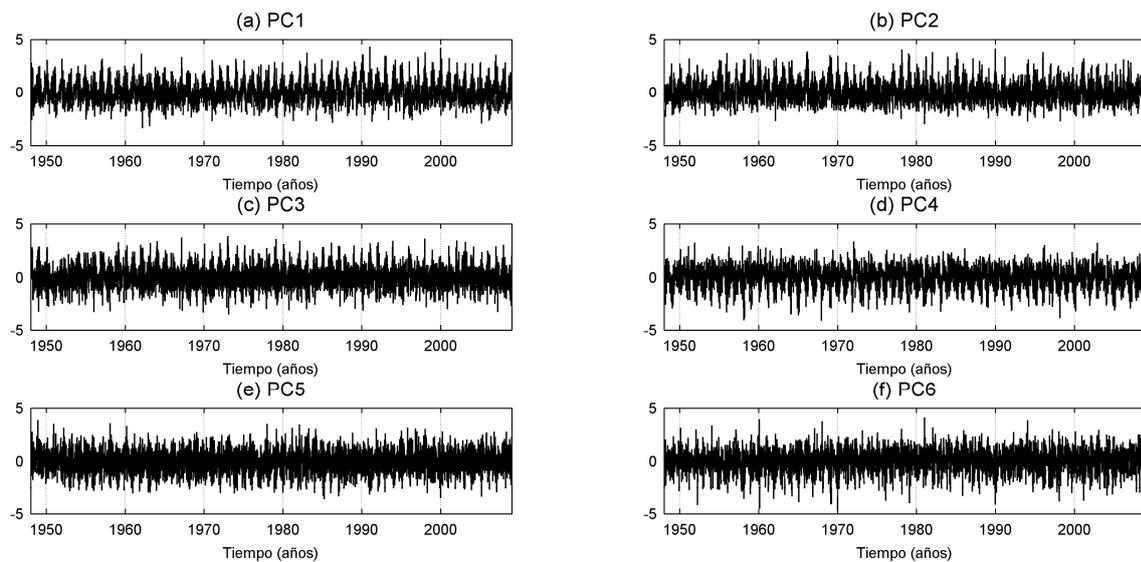


Figura 8.4. Evolución temporal de los 6 primeros modos temporales estandarizados de los gradientes de presiones medios 3-diaros en el área geográfica del Atlántico Norte

### 8.3.1. Técnica de clasificación $k$ -medias

Uno de los métodos más conocidos y sencillos en las técnicas de clasificación es el algoritmo de clasificación  $k$ -medias (Anderberg, 1973). El objetivo es minimizar globalmente la distancia entre clases, de manera que los estados de la atmósfera queden clasificados mediante  $k$  clases. El centroide de cada una de estas clases representa al grupo de estados de la atmósfera considerados afines, de acuerdo con la métrica utilizada en el algoritmo y, aunque no es real, se puede considerar como un tipo de tiempo.

La técnica de clasificación  $k$ -medias divide el conjunto de datos de partida en un determinado número de subconjuntos, definido cada uno de ellos por un prototipo, y formado cada uno de ellos por los datos para los cuales ese prototipo es el más cercano. Se establece el número de grupos deseado y se inicializan los prototipos (o centroides) y el algoritmo procede, de forma iterativa, moviendo estos centroides hasta minimizar la varianza total intra-grupos (Hastie et al., 2001). Esta varianza total intra-grupos significa que al final del proceso, la suma de distancias entre el prototipo y los datos correspondientes a cada prototipo es mínima.

Por tanto, se dispone de una muestra de datos  $\mathcal{X} = \{x_1, \dots, x_N\}$  compuesta por  $N$  vectores  $n$ -dimensionales, donde  $N$  es el número total de datos a clasificar y  $n$  es la dimensión de los vectores de la base de entrada  $x_k = \{x_{1k}, \dots, x_{nk}\}$ . El objetivo de la aplicación de la técnica de  $k$ -medias es obtener un número  $M$  de subconjuntos o grupos definidos cada uno de ellos por un prototipo o centroide  $v_k = \{v_{1k}, \dots, v_{nk}\}$  de la misma dimensión que los datos de partida, siendo  $k = 1, \dots, M$ .

El proceso de clasificación consiste en un ajuste de los centroides que comienza con la selección aleatoria de los mismos,  $\{v_1^0, \dots, v_M^0\}$  de entre los datos de partida (Peña et al., 1999). En cada ciclo, se identifican los datos de entrada más próximos a cada centroide y el nuevo centroide se redefine como la media de los vectores de entrada correspondientes a ese centroide. Por ejemplo, si en la iteración  $(r + 1)$ , cada vector  $x_i$

es reasignado al grupo  $j$ , donde  $j = \min\{\|x_i - v_j\|, j = 1, \dots, M\}$ , el centroide es actualizado según:

$$v_j^{r+1} = \sum_{x_i \in C_j} x_i / n_j$$

donde  $n_j$  es el número de vectores de entrada pertenecientes al grupo  $j$ . Después de varias iteraciones, el proceso converge cuando la pertenencia de los vectores a un grupo determinado se estabiliza.

### 8.3.2. Tipos de tiempo

Una vez definida el área de influencia de la zona de estudio y reducido el número de dimensiones se ha aplicado la técnica de clasificación  $k$ -medias. De esta manera se consigue comprimir la variable estado de la atmósfera en un escalar discreto (tipos de tiempo) que nos permitirá analizar de manera eficiente cambios en la distribución de probabilidad de ocurrencia de cada TT (que está directamente relacionada con el número de estados reales de la atmósfera que lo definen), estudiar los estadísticos (percentiles, medias, extremos) de la variable recurso surf que se puede extraer de cada TT o estudiar de forma conjunta los cambios en las condiciones de surf asociados con cada estado de TT.

Para reflejar mejor la variabilidad del estado de la atmósfera a escala diaria, interesa que haya muchos TTs diferentes, pues cuantas más clases haya, mejor representado estará cada estado real de la atmósfera por su correspondiente TT. Sin embargo, al mismo tiempo, también es necesario que las clases estén suficientemente pobladas como para realizar un análisis estadístico robusto, lo cual requiere que no haya demasiadas clases. Dada la longitud de las series y la escala espacio-temporal del dominio, se han probado diferentes valores de  $k$ , obteniendo para  $k=100$  el mejor compromiso entre los requerimientos anteriores.

El algoritmo  $k$ -medias es un eficiente método de clasificación pero, frente a otros métodos como las redes auto-organizativas, tiene la desventaja de que no dispone los

TT de forma ordenada. Esta característica de las redes auto-organizativas es muy beneficiosa, ya que permite visualizar relaciones entre diferentes clases e interpretar mejor los estados de la atmósfera. Para poder contar con esta ventaja, en este trabajo, se ha utilizado un algoritmo de ordenación que permite visualizar los TT obtenidos con  $k$ -medias en una rejilla con características de vecindad, de manera que la transición de unos TT a otros es suave. En la figura 8.5 se muestran los TT del Atlántico Norte obtenidos con  $k$ -medias y representados con características de vecindad.

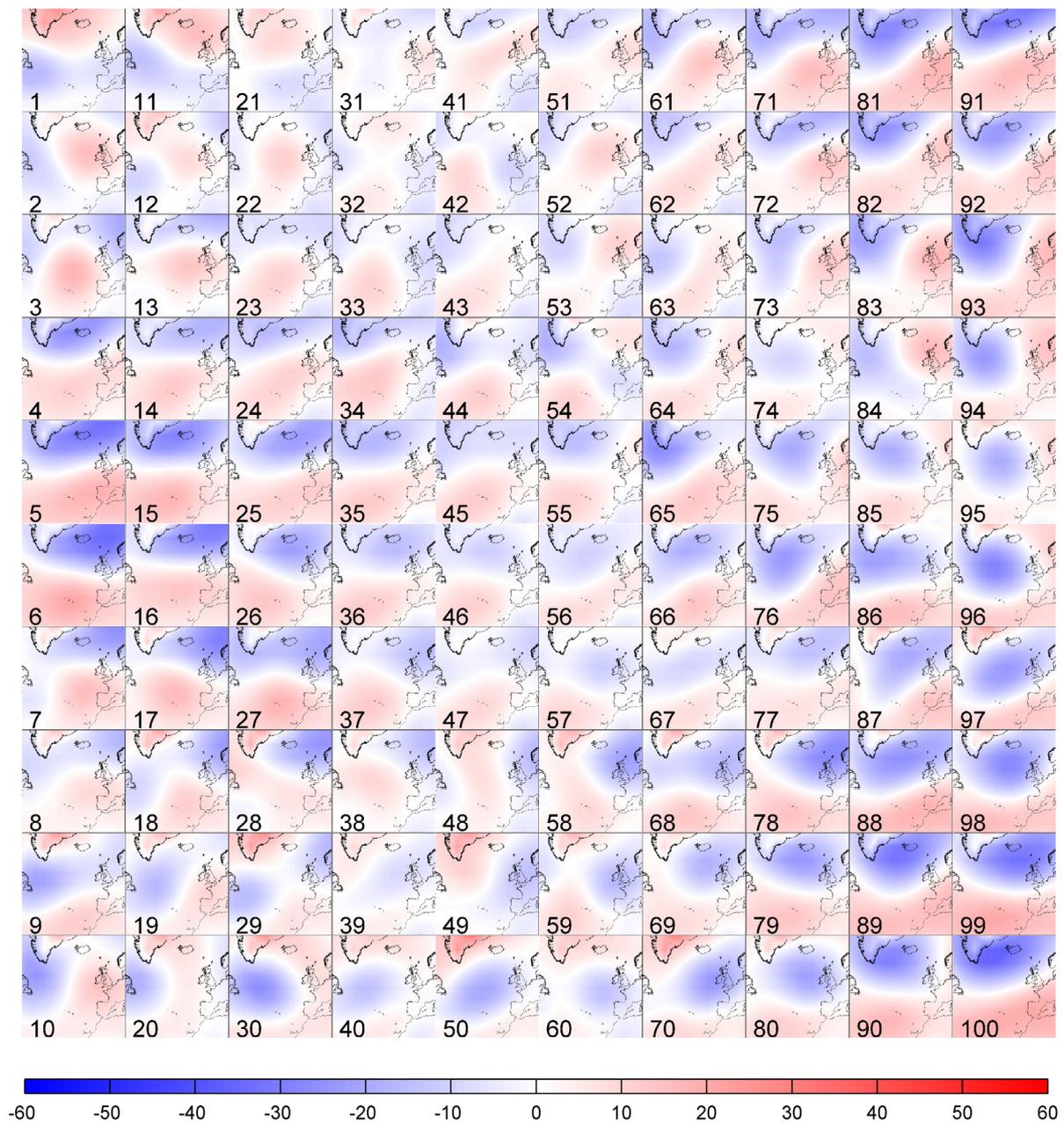


Figura 8.5. Tipos de tiempo de gradiente de presiones medias 3-diarias (mb) del Atlántico Norte

La situación NAO, dominante en el Atlántico Norte (Barnston y Livezey, 1987), aparece como una característica común en varios tipos de tiempo. La situación más representativa corresponde a las celdas número 5 y 100, y también se pueden ver situaciones de transición en las filas y columnas contiguas.

La figura 8.6 muestra el gráfico de probabilidades de  $k$ -medias para todo el período de tiempo 1948-2008, lo cual representa la probabilidad media de presentación.

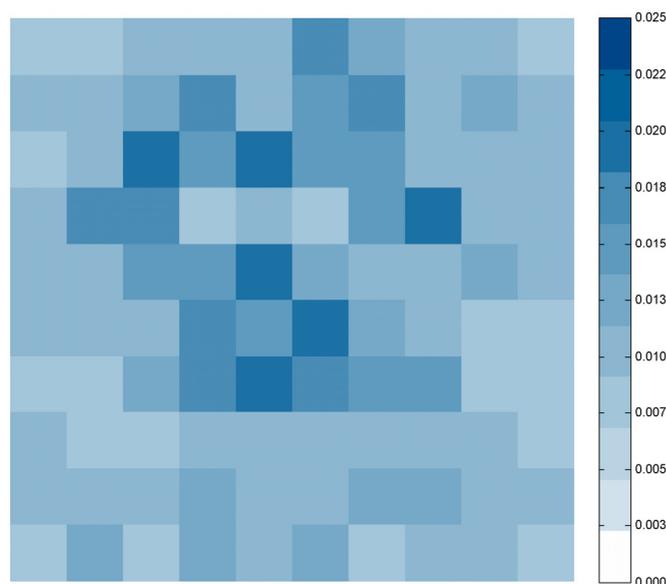


Figura 8.6. Probabilidades de ocurrencia en la rejilla de  $k$ -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

Así, para cada una de las celdas o centroides,  $c_i$ , de la clasificación con  $k$ -medias se obtiene una probabilidad de presentación  $p_i$ , tal que  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ , donde  $N$  es el número de clases de la clasificación ( $N = 100$  en el caso objeto de estudio).

Haciendo uso de la información temporal de los datos clasificados y de la frecuencia de presentación de cada centroide, se pueden construir los gráficos de probabilidades correspondientes a cada estación del año (figura 8.7).

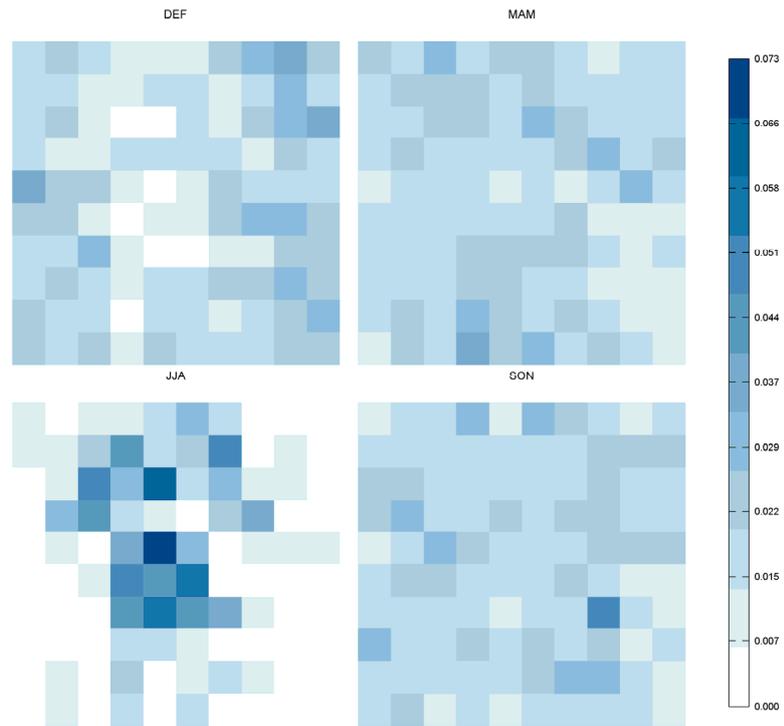


Figura 8.7. Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la rejilla de  $k$ -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

Igualmente se pueden construir los gráficos de probabilidad de ocurrencia para cada mes (figura 8.8).

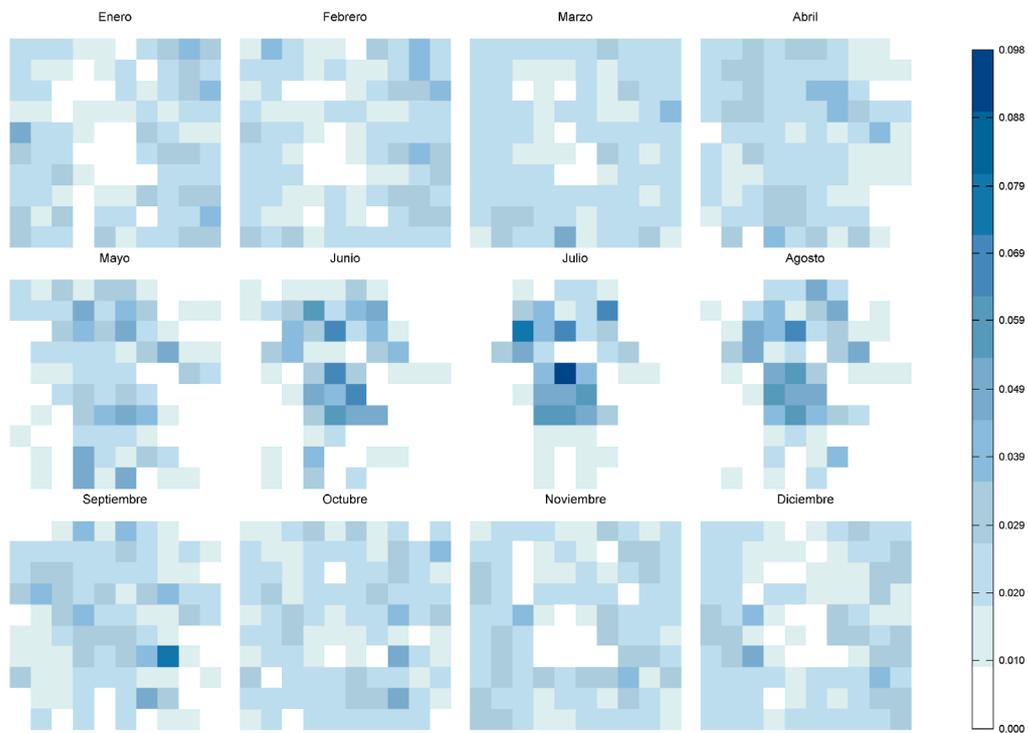


Figura 8.8. Probabilidades de ocurrencia por meses en la rejilla de  $k$ -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte

## 8.4. Análisis regional del recurso surf: Santander

La clasificación de la atmósfera en tipos de tiempo permite estudiar la variabilidad climática de las condiciones de surf de una determinada zona (escala regional). Las 100 situaciones atmosféricas se corresponden unívocamente con unas condiciones de oleaje y viento. Sin embargo, estas condiciones darán lugar a distinta calidad de surf en una misma zona, dependiendo de la situación y orientación del *spot*. Mediante la metodología aquí presentada es posible estudiar la variación espacial en la disponibilidad de surf de una región para cada TT. En esta tesis se ha analizado la variación en la tasa de ocurrencia del *Regional Surf Index* superior a 7 ( $P_{high}[RSI]$ ) y se ha aplicado a la costa cantábrica oriental. Para visualizar mejor los datos se ha hecho un *zoom* a la zona de Santander, en un área comprendida entre la Virgen del Mar y Langre, donde se encuentran los *spots* de La Maruca, El Sardinero, Somo o La isla de Santa Marina.

Previo al análisis espacial de  $P_{high}[RSI]$ , se ha hecho un análisis de las condiciones de oleaje y viento en profundidades indefinidas de la zona. Para ello, se han analizado los espectros medios 3-díarios reconstruidos en la posición de la boya exterior de Bilbao por medio de la metodología desarrollada en el capítulo anterior, lo cual aporta una gran cantidad de información acerca de la distribución de la energía del oleaje en el dominio de las frecuencias y direcciones. Se define el espectro medio 3-díario como:

$$\overline{S(f, \theta)} = \frac{1}{T} \int_t^{t+\tau} S_i(f, \theta) dt \quad (8.1)$$

siendo  $\tau$  el bloque de tiempo considerado, en este caso 3 días.

Para poder interpretar mejor los resultados, se presenta el espectro discretizado en función del periodo, en intervalos de 5 s, y en función de la dirección en intervalos de  $22.5^\circ$ , definiendo el espectro a través de 64 paquetes de energía. Para cada uno de estos paquetes se ha calculado la altura de ola significativa,  $h_{i,j}$  según:

$$h_{i,j} = 4.004\sqrt{m_{0i,j}} \tag{8.2}$$

siendo  $m_{0i,j}$  el momento de orden 0 de cada *bin*, definido según:

$$m_{0i,j} = \int_{f_i}^{f_{i+1}} \int_{\theta_j}^{\theta_{j+1}} S(f, \theta) df d\theta \tag{8.3}$$

de modo que se cumple que,  $H_s^2 = \sum_i \sum_j h_{i,j}^2$ .

Así, haciendo uso de la probabilidad de ocurrencia de *k*-medias, se han volcado sobre la rejilla de TT los espectros medios 3-diaros de oleaje de los 61 años de datos. El procedimiento es el siguiente, haciendo uso de la probabilidad de ocurrencia de *k*-medias, se identifica el TT al que corresponde cada valor medio 3-diaro del espectro de energía, de manera que al volcar toda la serie temporal se obtendrá una población de espectros en cada celda de *k*-medias. En cada paquete de energía, o *bin*, definido por un período y dirección se representa el valor de  $h_{i,j}$  en cm, figura 8.9.

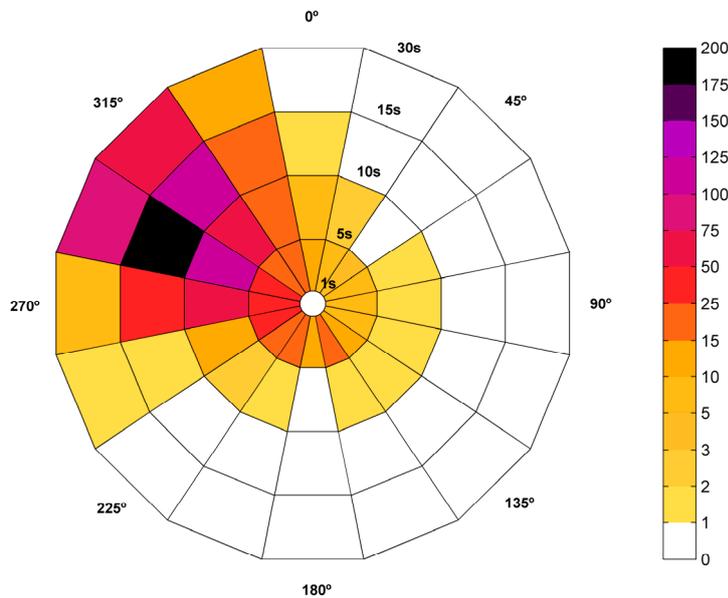


Figura 8.9. Espectro medio 3-diaro correspondiente al TT número 100 (cm). Posición en la boya de Bilbao

El TT número 100 produce una forma espectral media (figura 8.9) donde se aprecia un oleaje limpio y desarrollado con la mayor parte de la energía concentrada en los períodos altos (más de 10 segundos) procedente del oeste-noroeste. En el *bin* de energía

correspondiente a períodos de 10-15 segundos y dirección oeste-noroeste hay una altura de ola de hasta 2 m. Además este oleaje desarrollado viene acompañado de viento sur, el cual se ve reflejado en el espectro con alturas de ola de hasta 15 cm en los períodos pequeños (menos de 5 segundos) en las direcciones del 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> cuadrante. El resto de tipos espectrales se muestran en la figura 8.10.

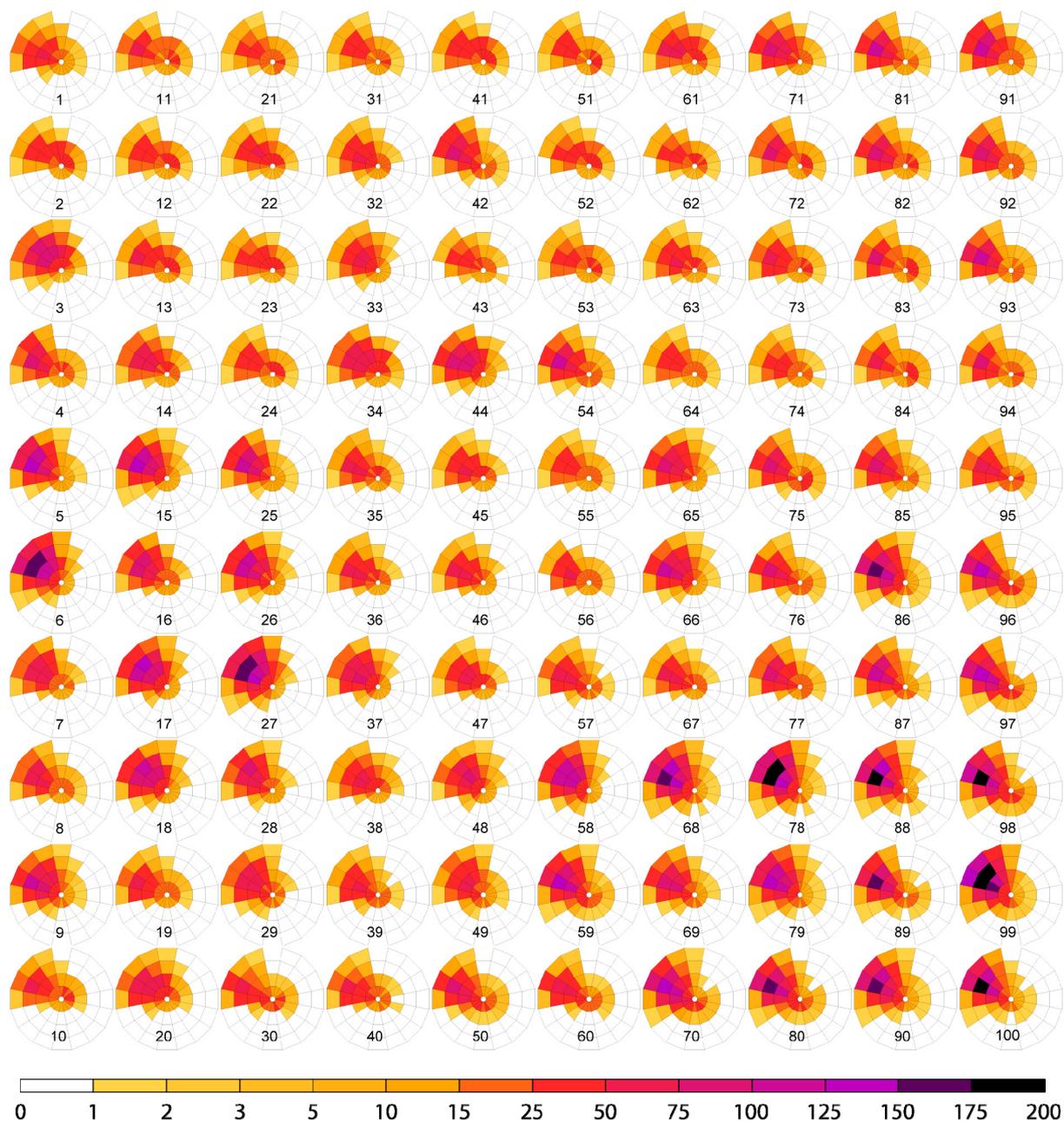


Figura 8.10. Espectro media 3 diario, asociado a cada tipo de tiempo (cm). Posición de la boya exterior de Bilbao

Se puede observar como los TT situados en la esquina inferior derecha de la rejilla son los que generan los oleajes más desarrollados, procedentes del noroeste, con la mayor parte de la energía concentrada entre los períodos 15 y 20 segundos. Por ejemplo, el TT

número 99 da lugar a un espectro con altura de ola próximas a los 2 m en los períodos de 15-20 segundos de dirección noroeste. Sin embargo, los TT situados en la parte central de la rejilla corresponden a situaciones atmosféricas anticiclónicas que generan oleajes del nordeste (*windswell* en esta zona) que transportan la mayor parte de la energía concentrada en los períodos bajos (entre 6 y 10 segundos) y estando la energía muy distribuida (cada paquete de energía contiene en torno a 25-50 cm).

Estudios previos del oleaje en el Mar Cantábrico oriental muestran dos tipos de mares dominantes en la zona: los oleajes desarrollados procedentes del noroeste (típicos en invierno) y los mares de viento procedentes del nordeste (típicos de situaciones anticiclónicas). Sin embargo, el estudio de los espectros del oleaje proyectados en la rejilla de TT muestra como los oleajes en esta zona son más complejos. A continuación se van a comentar tres tipos de mares.

El TT número 3 muestra un oleaje de tipo *windswell* procedente de dirección noroeste. En este caso se puede ver que la mayor parte de la energía (figura 8.11) está concentrada en los períodos bajos (hasta 1.25 m de altura de ola en periodos menores a los 10 segundos) y proviene de dirección noroeste. Observando el TT correspondiente se ve que la situación atmosférica muestra un anticiclón que genera vientos del norte sobre el punto de estudio.

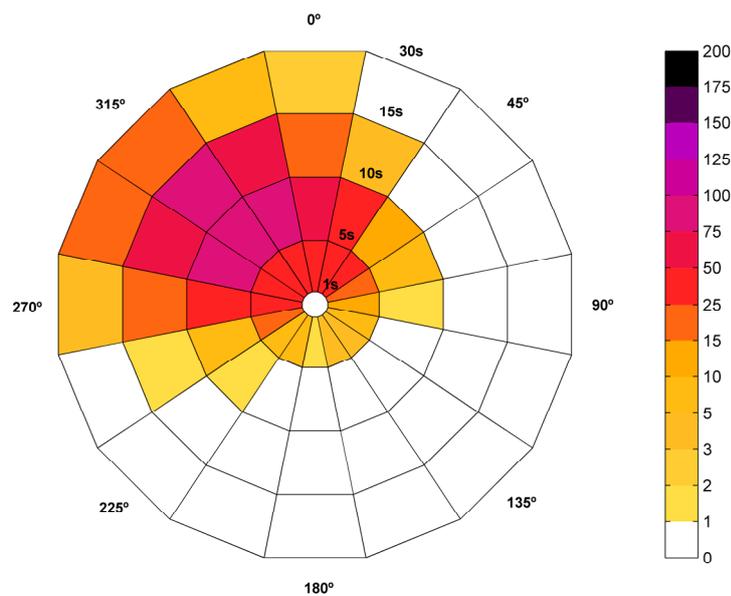


Figura 8.11. Espectro medio 3-diario correspondiente al TT número 3 (cm). Posición en la boya de Bilbao

Por último, el TT número 83 da lugar a un oleaje mezclado en la posición de la boya de Bilbao. En la forma espectral media (figura 8.12) se puede ver la energía repartida entre los sectores del oeste-noroeste (hasta 1 m de altura de ola en esta dirección en los períodos entre 10 y 15 segundos) y los de componente este (alturas de ola de hasta 0.5 m en períodos menores de 10 segundos). La localización de la energía en los distintos *bins* muestra un oleaje de tipo *groundswell* del oeste-noroeste, generado por una borrasca situada sobre Groenlandia, junto con otro de *windswell* procedente del este, generado por vientos anticiclónicos procedentes de altas presiones sobre el oeste de las Islas Británicas.

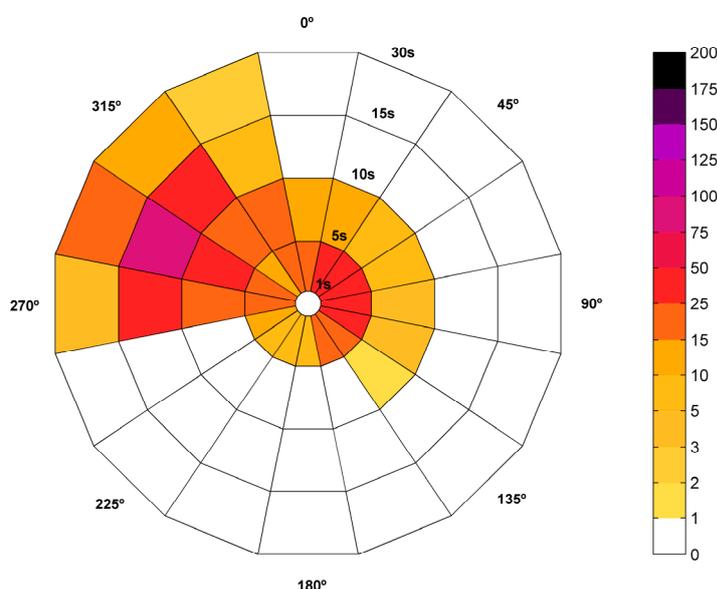


Figura 8.12. Espectro medio 3-diario correspondiente al TT número 83 (cm). Posición en la boya de Bilbao

Una vez analizado el espectro del oleaje de la zona y conocidos los tipos oleajes característicos en el Cantábrico Oriental se ha estudiado la variación espacial de  $P_{high}[RSI]$ . Para ello se han volcado sobre la rejilla de TT las  $P_{high}[RSI]$  medias 3-diarías en cada punto del dominio y se ha representado el valor medio de cada uno de ellos (figura 8.13).

Combinando la información del análisis de los espectros y la tasa de ocurrencia,  $P_{high}[RSI]$  se pueden obtener numerosas conclusiones. Se puede ver como el TT 99, que genera oleajes procedentes las direcciones oeste-noroeste y norte, con la energía concentrada en las frecuencias bajas (en torno a los 15-20 segundos de período) solo produce buenas condiciones para el surf en la zona más protegida de la playa del Sardinero, al abrigo de Cabo Menor. Esto es debido a que la energía que transporta este

tipo de oleajes es muy grande, por lo que en las zonas directamente expuestas la práctica del surf es inviable. Esto hace que solo en zonas muy protegidas del oleaje y el viento sea posible la práctica del surf.

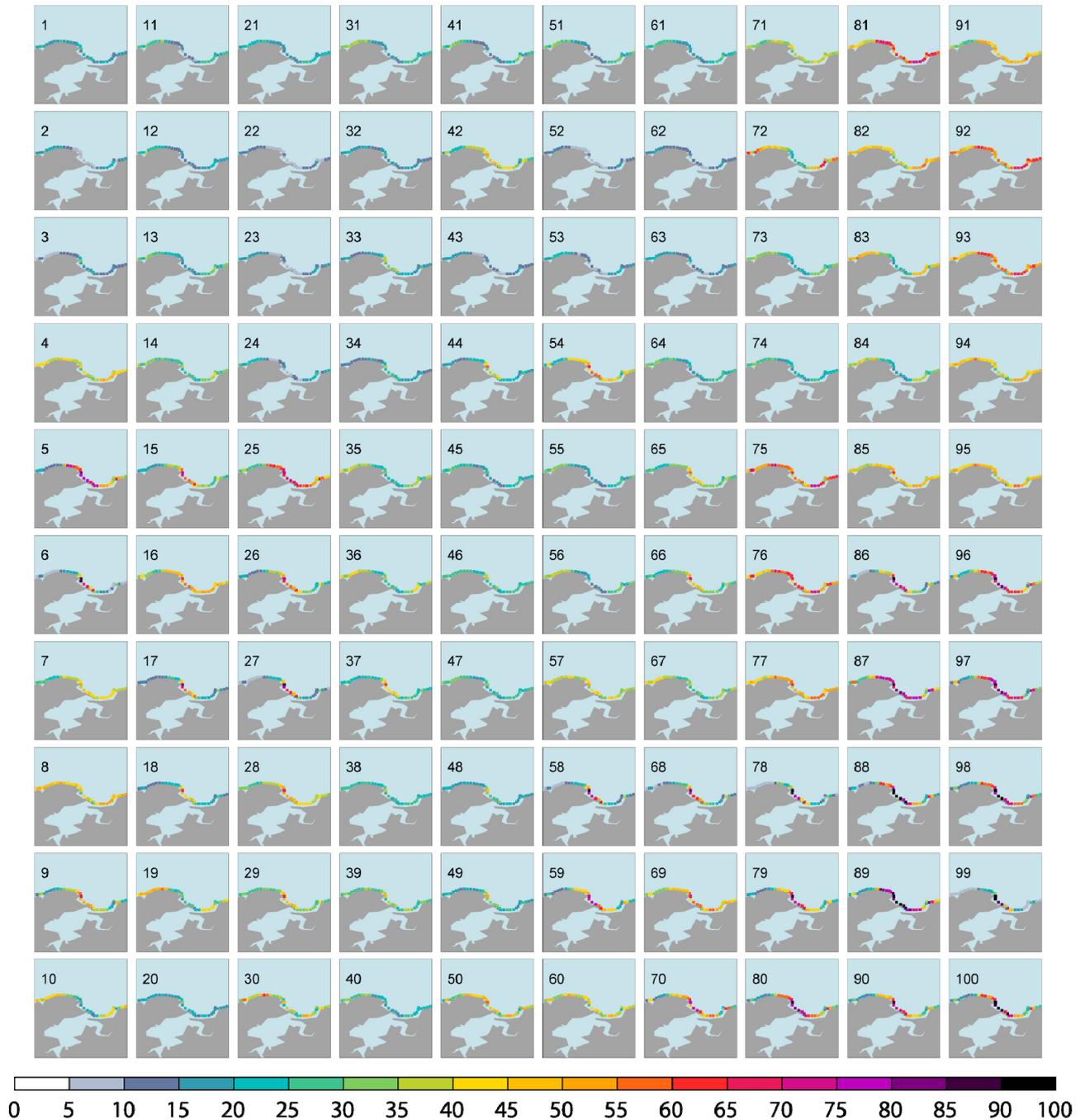


Figura 8.13.  $P_{high}[RSI]$  medio 3-diarario en Santander, asociado a cada tipo de tiempo.

Por el contrario, el TT 72 está caracterizado por una borrasca noratlántica con su centro de bajas presiones situado al sur de Groenlandia y un anticiclón sobre la Península Ibérica. Esta situación genera un oleaje limpio del noroeste con la energía concentrada entre los 15 y 20 segundos (en torno a 0.5-0.75 m), junto con vientos del nordeste,

representados en el espectro con poca energía concentrada sobre los períodos bajos (espectro 12 de la figura 8.10). Estas condiciones de oleaje y viento dan lugar a una alta ocurrencia de buenas condiciones de surf en los *spots* de La Maruca, La curva de Loredo y La Isla de Santa Marina, los cuales se encuentran expuestos a los oleajes del noroeste y protegidos por los vientos del nordeste.

Sin embargo, mediante este tipo de análisis también se puede comprobar como los mejores oleajes para el surf no son sólo aquellos procedentes del noroeste y con períodos más altos. Situaciones atmosféricas que generan oleajes con menor período y acompañados de vientos favorables también generan buenas condiciones de surf en gran parte de la zona estudiada. Es el ejemplo del TT 75. Esta situación atmosférica, caracterizada por una borrasca con centro de bajas presiones alejado y anticiclón próximo a la zona de estudio, genera un oleaje con la energía concentrada en torno a los 10-15 segundos y procedente de  $285^{\circ}$ - $330^{\circ}$  (WNW-NNW). Esta situación produce condiciones de surf de alta calidad el 75% del tiempo en prácticamente toda la zona de estudio.

## 8.5. Análisis local del recurso surf: Mundaka

Una vez estudiada la escala regional, y vistas las variaciones espaciales en la tasa de ocurrencia de surf de alta calidad se plantea un estudio más detallado a escala local. Para ello se ha hecho un análisis de las condiciones de surf en el *spot* de Mundaka.

En primer lugar, haciendo uso de la información espectral, se han proyectado en la rejilla de TT los valores medios 3-diaros de los espectros de energía de los 61 años propagados y reconstruidos en el *spot* de Mundaka (figura 8.14). En este caso se puede ver como, debido a los efectos locales de la batimetría y los procesos de propagación del oleaje, la energía queda concentrada fundamentalmente en las direcciones nor-noroeste y este. Por un lado, los efectos de la refracción y difracción en el Cabo Machichaco producen la concentración de los oleajes de componente oeste en los sectores de dirección nor-noroeste. Por otro lado, el oleaje del nordeste, generado por los vientos de esta componente, interceptan la Isla de Ízaro, y por refracción adoptan dirección este, además cierta energía de baja frecuencia procedente del NW difracta alrededor de la isla, motivo por el cual el espectro medio 3-diaro muestra dos sectores diferenciados.

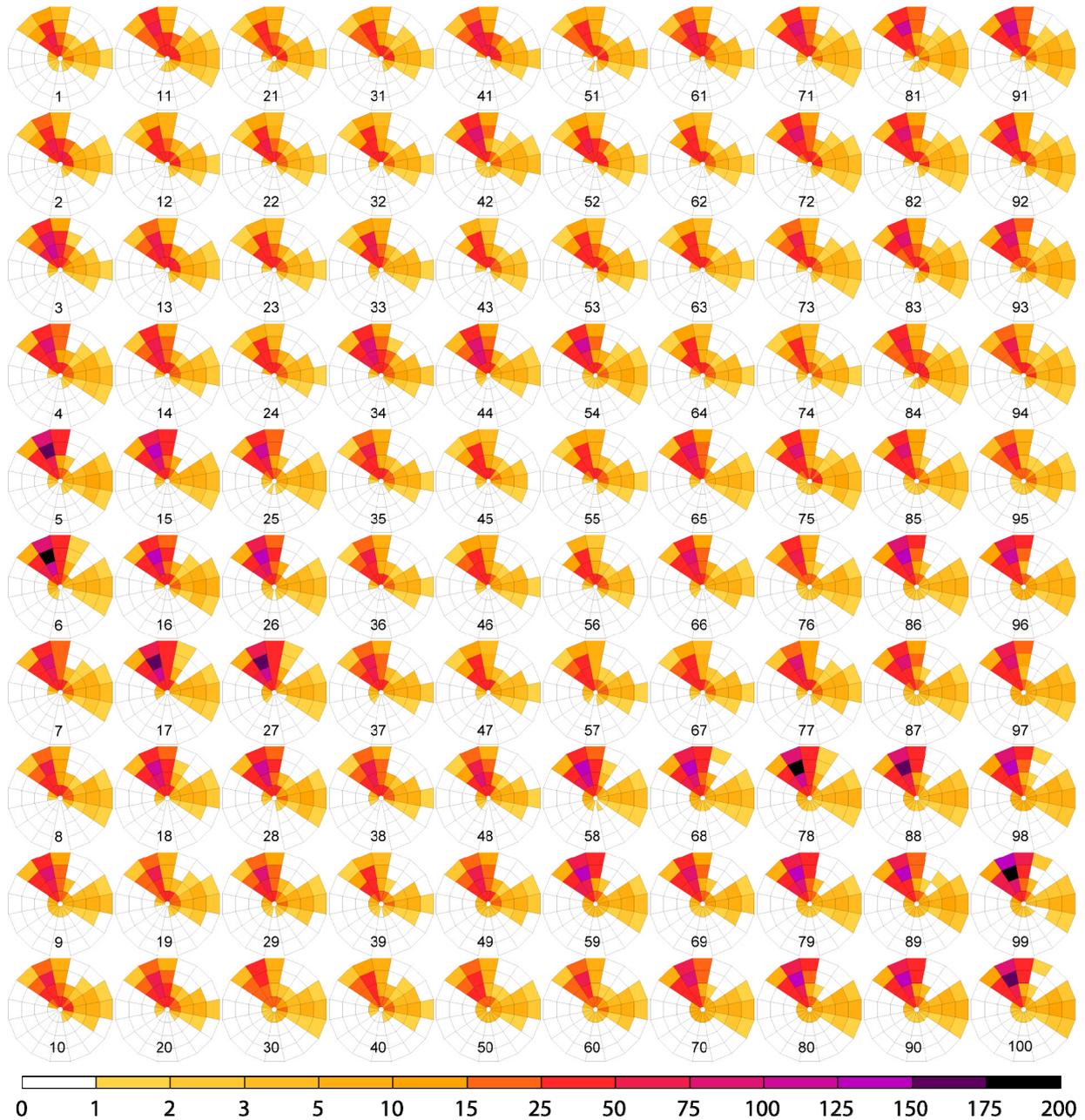


Figura 8.14. Espectro medio 3 diario, asociado a cada tipo de tiempo (cm). Mundaka

El segundo paso, una vez obtenida la serie temporal del índice  $RSI$  en Mundaka, es volcar sobre la rejilla  $k$ -medias sus valores medios 3-diaros. En cada celda se obtendrá una población de datos de  $RSI$  medio 3-diaro en la que se ha analizado la probabilidad de ocurrencia de cada calidad de condiciones de surf, obteniendo los valores  $P_{high}[RSI]$ ,  $P_{medium}[RSI]$  y  $P_{low}[RSI]$  representando cada situación por su correspondiente histograma (figura 8.15). El criterio aplicado aquí ha sido el establecido en el Capítulo 5, desarrollado para un análisis regional. Sin embargo, para hacer un análisis más fino y

depurado del recurso surf en un determinado *spot* podrían modificarse los criterios incluyendo condicionantes específicos de la rompiente, como por ejemplo: la profundidad del elemento batimétrico que produce la rotura, el ángulo de incidencia del oleaje óptimo, rangos específicos de alturas de ola, periodos, etc.

Un primer análisis visual de los histogramas muestra como hay ciertos TT que generan mejores condiciones de surf que otros. Hay que tener en cuenta que la visualización de un determinado tipo de tiempo es un estado medio de todos los oleajes que han caído en un determinado TT, es por ello que una misma celda puede aglutinar, en algunos casos, una tasa de ocurrencia similar de condiciones buenas, medias o malas de surf (como por ejemplo el tipo de tiempo correspondiente a la celda 36).

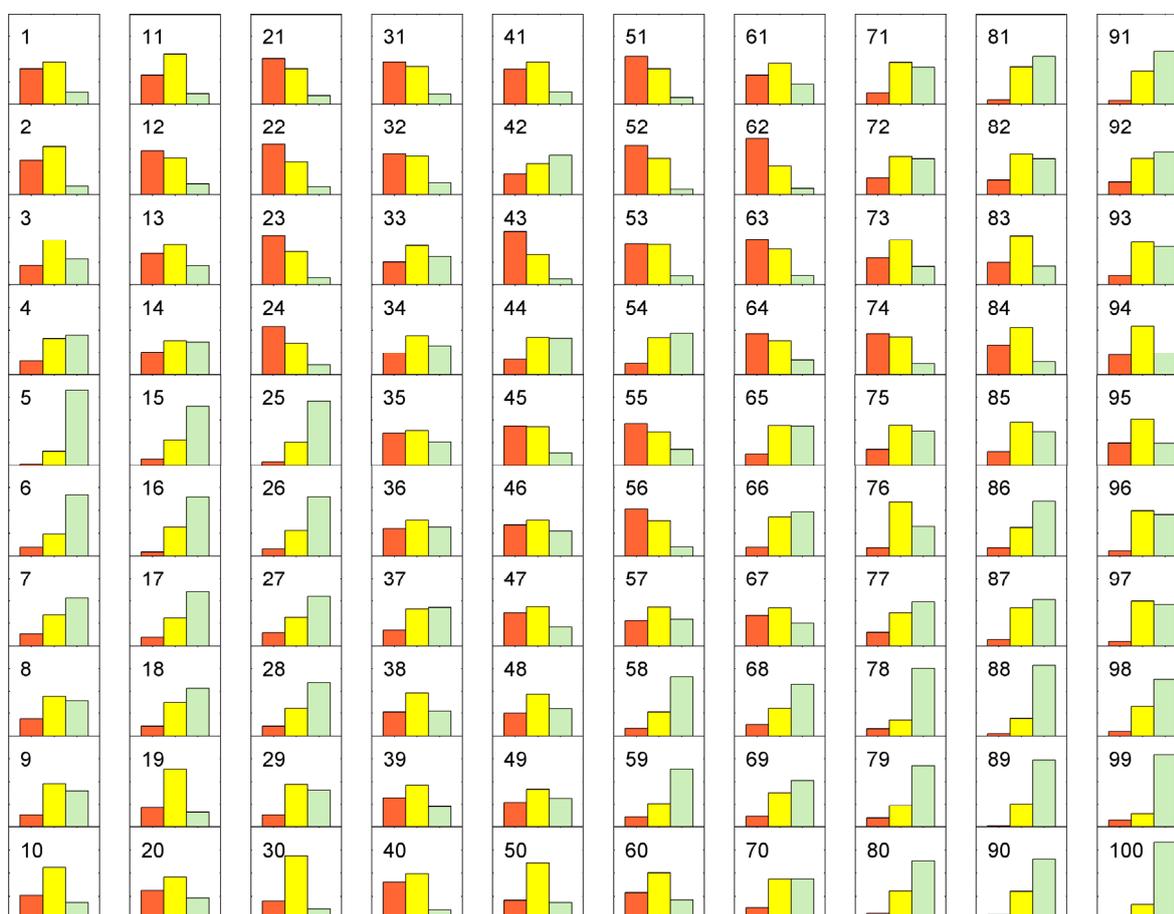


Figura 8.15. Tasa de ocurrencia de distintas clases de calidad de surf en Mundaka asociadas a cada tipo de tiempo.

La combinación de la información atmosférica, espectral del oleaje y estadística del índice RSI permite hacer un análisis riguroso del recurso surf en un determinado *spot*. A

continuación se van a analizar dos tipos de tiempo que generan condiciones de surf muy diferentes en Mundaka.

La situación sinóptica correspondiente a la celda número 5 da lugar a buenas condiciones de surf un 82.85 % del tiempo, mientras que solo el 1.45 % del tiempo las condiciones son impracticables. Hay que tener en cuenta que estos TT no son campos de presiones totales, sino que son gradientes espaciales de presión, es decir, que lo que intentan resaltar son las inestabilidades y zonas de mayores diferencias de presión, que son las que generarán los vientos responsables del oleaje. Este TT está caracterizado por una fuerte diferencia de bajas presiones situada al este de Islandia y una diferencia suave de altas presiones sobre el oeste de la Península Ibérica (isobaras más separadas).

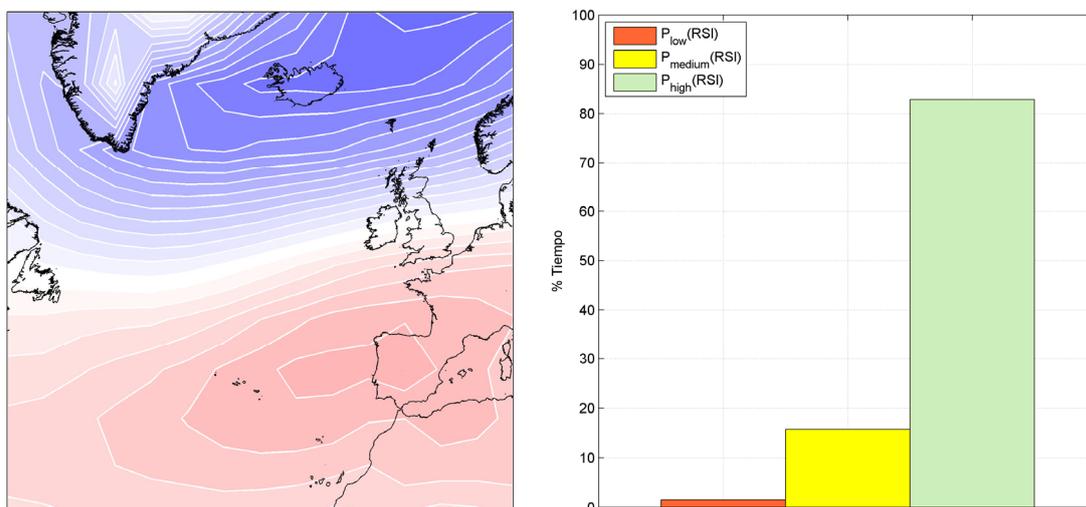


Figura 8.16. Situación sinóptica y condiciones de surf correspondientes a la celda 5. Mundaka

El análisis del espectro de energía medio 3-diarario en profundidades indefinidas correspondiente a este TT (figura 8.16) permite identificar los oleajes generados por esta situación atmosférica. Además, el espectro de energía medio 3-diarario en el punto de estudio para ese TT y su comparación con el de aguas profundas permite interpretar los procesos que sufre el oleaje hasta llegar a la costa (figura 8.17).

La borrasca da lugar a un oleaje generado entre Islandia y Groenlandia que se propaga por el Atlántico Norte y llega al Cantábrico oriental con la mayor parte de la energía concentrada en las direcciones oeste-noroeste y nor-noroeste y los períodos 10-15 segundos (espectro en profundidades indefinidas de la figura 8.17). En estos *bins* la altura de ola está en torno a 1 m. Además, en el punto de estudio los vientos son débiles

asociados a la situación anticiclónica y la poca separación entre las isobaras. Observando el espectro asociado en la posición de la boya de Bilbao, se puede comprobar como las direcciones de componente sur muestran cierta energía, en torno a 10 cm, en períodos por debajo de 5 segundos, lo cual significa que ante esta situación, son probables vientos de componente sur. En este caso se juntan dos circunstancias necesarias para la obtención de buenas condiciones de surf, que son un oleaje generado a una distancia suficiente, junto con vientos muy débiles, o en todo caso de dirección *offshore*. El análisis del espectro en el *spot* muestra como, los procesos de propagación, concentran la energía del noroeste en los sectores nor-noroeste, y la energía, que en aguas indefinidas estaba repartida entre los 5 y los 15 segundos, queda concentrada en períodos más altos, de 1 a 1.5 m entre los 10 y 20 segundos. En profundidades reducidas puede comprobarse como hay algo más de energía en los sectores de componente este y períodos altos (en torno a 10 cm de altura de ola). Esto es debido a la difracción de las componentes de mayor periodo provocada por la isla de Ízaro, y su posterior refracción, De todas formas la energía contenida en este sector es siempre inferior a los 15 cm, por lo que su afeción a la calidad de las condiciones de surf es mínima.

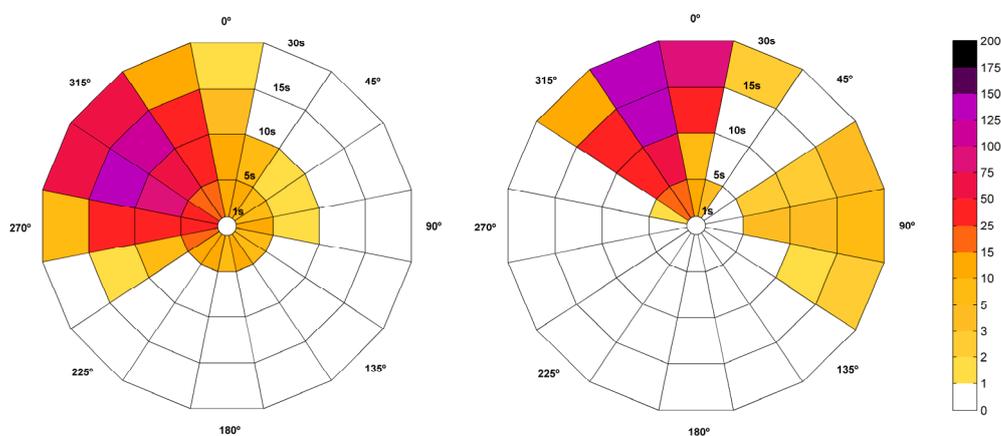


Figura 8.17. Espectro medio 3-diarario correspondiente a la situación sinóptica 5. Posición en la boya de Bilbao (izquierda) y Mundaka (derecha)

La situación sinóptica correspondiente a la celda número 62 muestra unas condiciones muy distintas a la analizada previamente. En este caso, este tipo de tiempo da lugar a malas condiciones de surf el 61.44 % del tiempo, mientras que sólo se producen condiciones buenas el 6.9 % del tiempo. El tiempo restante se dan condiciones medias para el surf. Analizando la situación sinóptica, se puede ver que está caracterizada por un campo de diferencias de presión muy débiles. Sobre las Islas Azores. Extendiéndose

hacia las Islas Británicas se manifiesta un campo débil de altas presiones que genera mar de viento del NE. La separación de las isobaras muestra vientos débiles que no genera grandes olas. Por otro lado, aparecen dos centros de bajas presiones de muy poca intensidad localizadas sobre Groenlandia y sobre el África Subsahariana.

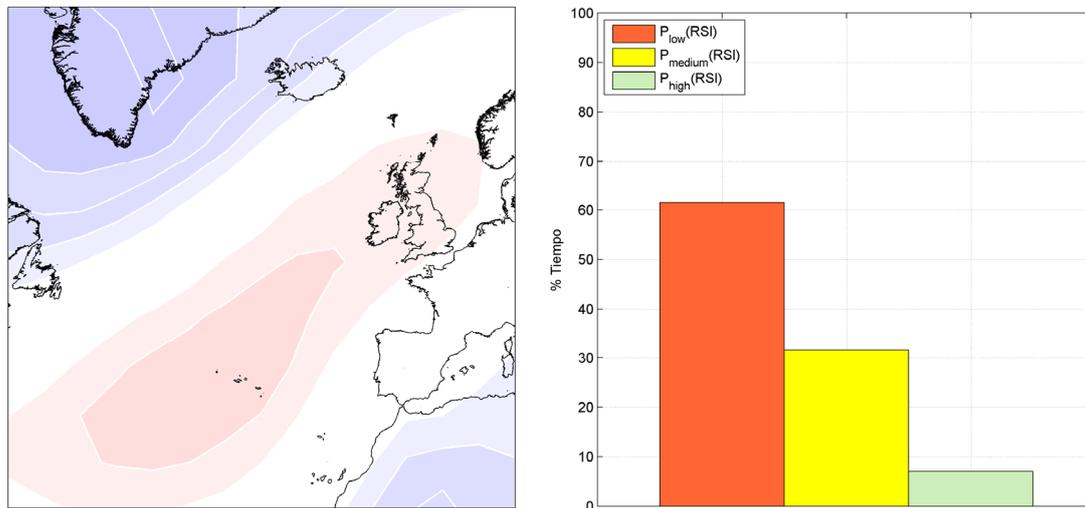


Figura 8.18. Situación sinóptica y condiciones de surf correspondientes a la celda 62. Mundaka

El análisis del espectro de energía medio 3-diario en profundidades indefinidas muestra un mar poco energético pero bastante mezclado. Por un lado coexiste un oleaje del oeste-noroeste con altura de ola de 0.5 m repartida entre períodos muy bajos y hasta los 15 segundos, es decir, un oleaje joven junto con otro oleaje de viento del noroeste generado en la zona. Por otro lado, también se aprecia energía en los períodos bajos de los sectores del este, lo que indica un oleaje de viento del nordeste. Al observar el espectro en el *spot* de Mundaka se ve como los procesos de propagación concentran el oleaje de componente oeste hacia la dirección nor-noroeste y la energía del *sea* de componente este se concentra a mayores períodos.

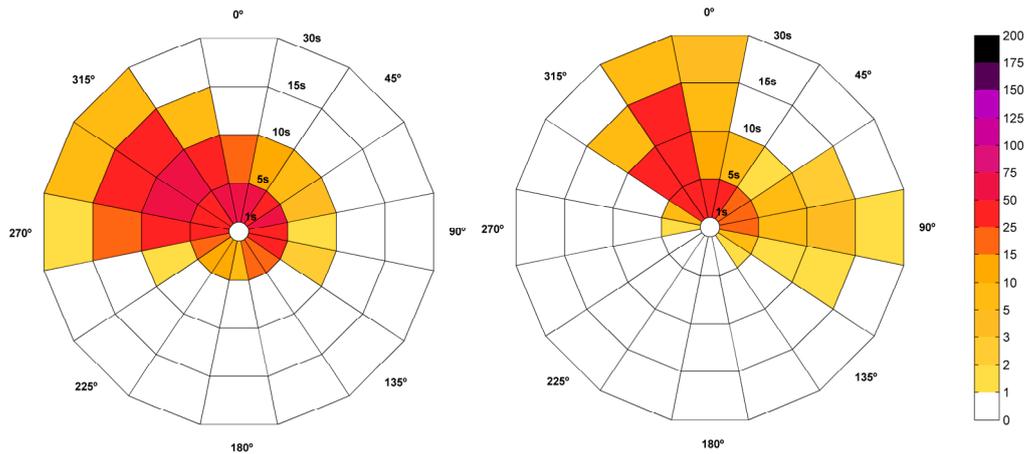


Figura 8.19. Espectro medio 3-diaro correspondiente a la situación sinóptica 5. Posición en la boya de Bilbao (izquierda) y Mundaka (derecha)

La representación en la rejilla de  $k$ -medias de la tasa de ocurrencia de cada calidad de surf en cada una de las celdas da lugar a la figura 8.20. En ella se puede ver claramente como los TT que mejores condiciones de surf generan en Mundaka son los correspondientes a las celdas 5 y 100 y sus contiguas, que son atribuibles a la situación NAO y transitorias. Por otro lado, los TT que dan lugar a malas condiciones de surf en Mundaka son los situados en la parte superior izquierda de la rejilla, que se corresponden con situaciones caracterizadas por altas presiones en el norte de la península (Groenlandia, Islandia, Islas Británicas...).

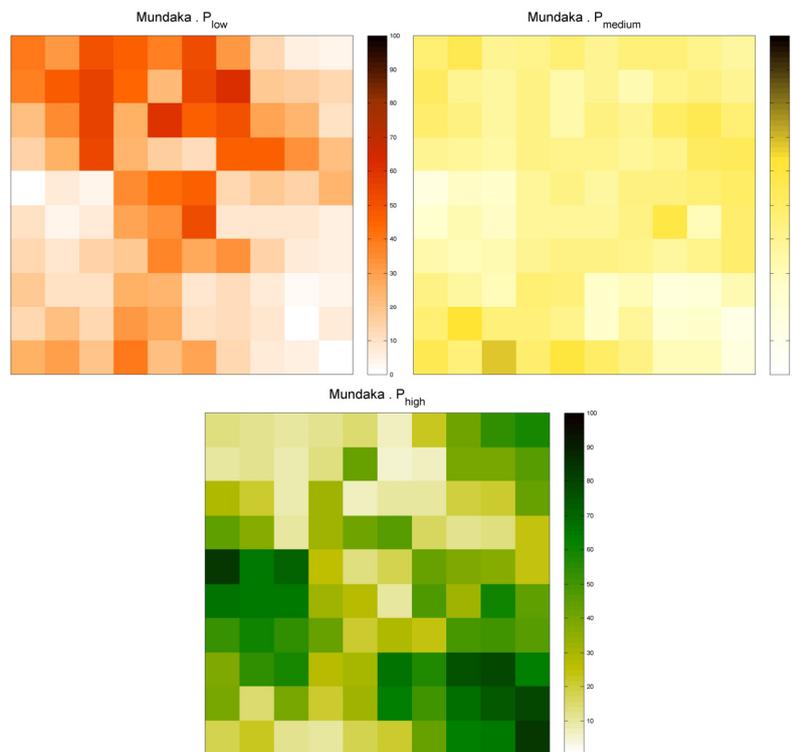


Figura 8.20. Probabilidad anual de las tres calidades de condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka

Las condiciones de surf de alta calidad se producen en Mundaka el 32.63% del tiempo del año. La probabilidad con la que contribuye cada TT a este total se muestra en la figura 8.21., la cual se ha obtenido multiplicando la tasa de ocurrencia de buenas condiciones de surf generada por cada TT por la probabilidad de ocurrencia de la rejilla  $k$ -medias.

$$P_{high}^{Mundaka} [RSI] = \sum_{i=1}^{100} p_{high_i} \cdot p_i = 32.63\% \tag{8.4}$$

donde  $p_{high_i}$  es la tasa de ocurrencia de buenas condiciones de surf, en %, en la celda  $i$  y  $p_i$  es la probabilidad de ocurrencia de  $k$ -medias.

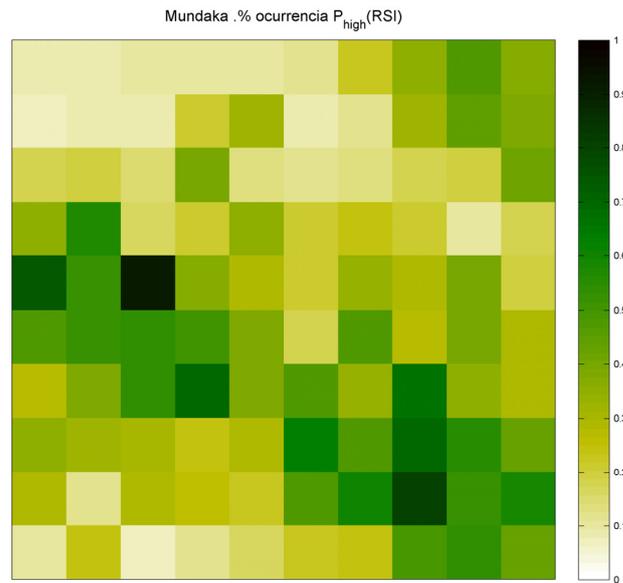


Figura 8.21. Probabilidad anual de buenas condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka

En este caso se puede ver que, aunque las celdas 5 y 100 son las que mejores condiciones de surf generan en Mundaka (82.85 % y 83 % del tiempo). La situación sinóptica de la celda 5 tiene mayor probabilidad de ocurrencia, por lo que contribuye en mayor medida que la 100, que se da en menos ocasiones. Igualmente, hay otros tipos de tiempo que no generan tan buenas condiciones de surf como la 100, pero su mayor ocurrencia da lugar a que contribuyan en mayor medida a probabilidad anual de buenas condiciones de surf en Mundaka.

Utilizando la probabilidad de ocurrencia de cada celda por estaciones y la tasa de ocurrencia de condiciones buenas de surf para cada tipo de tiempo se obtiene el porcentaje de tiempo en el que se producen condiciones de surf de alta calidad en cada estación en Mundaka:

|                | DEF   | MAM   | JJA   | SON   |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| % Tiempo RSI>7 | 45.34 | 29.18 | 18.77 | 37.55 |

Tabla 8.1 Tasa de ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad (RSI>7) por estaciones. Mundaka

Representando la probabilidad con que contribuye cada tipo de tiempo a estos porcentajes en la rejilla  $k$ -medias se obtienen los gráficos de la figura 8.22.

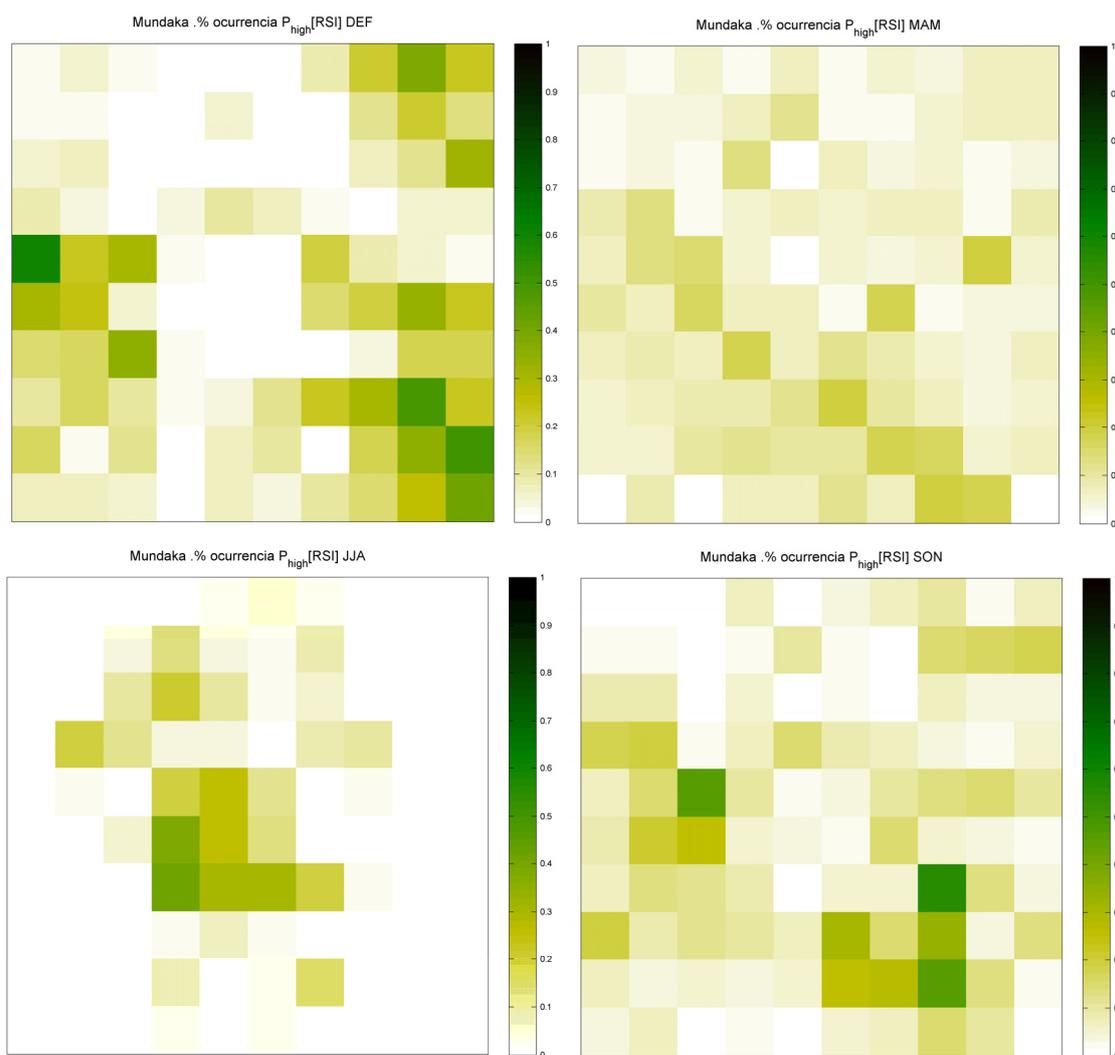


Figura 8.22. Probabilidad estacional de buenas condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka

El análisis del recurso surf en Mundaka utilizando tipos de tiempo muestra una tasa de ocurrencia de buenas condiciones de surf en este *spot* un 32.63 % del tiempo al año, siendo las estaciones de primavera y otoño las que presentan mejores condiciones. Nótese que estos valores son sin tener en cuenta la marea astronómica, ni la duración del día. Así, esta rompiente, conocida en el mundo entero por su calidad, presenta una probabilidad de ocurrencia real muy baja, pues el valor de  $P_{high}[RSI]$  se vería reducido. Sin embargo, la metodología empleada permite identificar las situaciones atmosféricas más beneficiosas para el surf en el *spot* estudiado, siendo aquellas borrascas noratlánticas localizadas entre Islandia y las Islas Británicas junto con altas presiones sobre Península Ibérica, las que generan las mejores condiciones de surf, puesto que dan lugar a oleajes del noroeste desarrollados que inciden en Mundaka acompañados de vientos del sur.

El análisis de los espectros de oleaje en Mundaka demuestra como los procesos de propagación modifican el grado de limpieza de los oleajes del noroeste sobre los sectores nor-noroeste, filtrando la energía contenida en las altas frecuencias. Este preacondicionamiento previo del oleaje antes de la rotura, es responsable de la calidad del oleaje en la ensenada de Mundaka, que con la correcta disposición de la barra, es capaz de generar condiciones de surf únicas en el mundo.

## 8.6. Conclusiones

En este capítulo se presenta una metodología para analizar las condiciones de surf en una zona o *spot* combinando la información correspondiente a las variaciones en la situación atmosférica mediante el uso de la climatología sinóptica, con el espectro de energía de oleaje en la zona de estudio y el *Regional Surf Index*. Por tanto, esta metodología hace uso de la climatología sinóptica, el análisis espectral del oleaje y el estudio estadístico del recurso surf.

Utilizando algoritmos de clasificación (*k*-medias) y de representación gráfica, se obtienen los tipos de tiempo característicos de la zona de generación de oleaje que incide en la zona de estudio, representados sobre una rejilla. Haciendo uso de las probabilidades de ocurrencia de cada tipo de tiempo se calculan los espectros medios 3-

diarios en dos puntos que caractericen el oleaje en profundidades indefinidas y reducidas. Estos espectros se obtienen por medio de la metodología de transferencia del oleaje desarrollada en el capítulo anterior.

El análisis del área de estudio situado en las inmediaciones de Santander se hace volcando sobre cada celda de la rejilla de tipos de tiempo la tasa de ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad,  $P_{high}[RSI]$ , obteniendo así, en cada celda, un mapa con la variación espacial de las condiciones de surf de alta calidad en la zona.

Para estudiar el *spot* de Mundaka se ha volcado sobre la rejilla k-medias los valores de *RSI* en bloques de tres días, obteniendo, para cada tipo de tiempo, la tasa de ocurrencia de las condiciones de cada calidad establecida. Por lo tanto, combinando la información atmosférica (tipos de tiempo), espectral del oleaje (espectro de energía) y estadística del recurso surf (*RSI*) se ha realizado un análisis completo del recurso surf en un determinada zona o *spot*.

Para el análisis de las condiciones de surf en Mundaka, las distintas variables han sido evaluadas con base a criterios genéricos, pero específicos de la región, y considerando solo el oleaje y el viento. Los resultados muestran qué situaciones atmosféricas generan buenas condiciones de surf en Mundaka, siendo posible identificar la probabilidad de ocurrencia de los tres tipos de calidad establecidos, es decir cuantificar el recurso. Del análisis realizado se concluye que son las situaciones NAO positiva o fase fluida las que en mayor medida condicionan la disponibilidad de condiciones de surf. Además, por medio del análisis de los espectros medios 3-diaros, se obtiene información acerca de la distribución de la energía en el dominio de la frecuencia y direcciones, lo cual sirve para contrastar los resultados obtenidos al aplicar el *RSI*.

Al comparar los espectros medios 3-diaros calculados en la posición de la boya exterior de Bilbao con los calculados en las inmediaciones de la rompiente de Mundaka, se aprecian las importantes transformaciones en la estructura del oleaje inducidas por la configuración singular de la costa en esta zona. De esta manera, se demuestra la importancia de la configuración de la costa, necesaria para generar condiciones de oleaje de alta calidad para el surf, mucho antes de que se produzca la rotura.

