

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

## CAPÍTULO 5

# ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO

SURF



## 5.1. Introducción

Como se explicó en el Capítulo 1, la calidad del surf obedece tanto a las características batimétricas locales de la rompiente como a las características del clima marítimo. La longitud de la ola, el *peel angle* o la altura de ola en rotura, son parámetros que pueden ayudar a clasificar y diferenciar el surf que tiene lugar en diferentes rompientes. De esta forma, puede decirse que una rompiente es mejor que otra, porque las olas que allí suelen romper son más largas, más potentes o más maniobrables.

Las rompientes de surf son formaciones naturales singulares y raras en determinadas regiones del planeta, pues no solo han de contener unas características topobatométricas concretas, si no que han de presentar un clima marítimo apropiado, que les confiera cierta consistencia. Un factor fundamental para todos los tipos de rompiente, es la ocurrencia frecuente de unas condiciones favorables de oleaje y viento, sin las cuales el surf sería inexistente. El que una rompiente dada presente un mayor número de eventos surfeables a lo largo del año, le confiere una característica: la consistencia. Se dice que una rompiente es consistente cuando en ella ocurren frecuentemente condiciones favorables para el surf. Sin embargo, esto no quiere decir que las olas que allí rompen sean de buena calidad.

Debido a la disponibilidad de bases de datos fiables de oleaje y viento, hoy día, la ocurrencia de condiciones de surf puede ser analizada a distintas escalas espaciales, generando información muy valiosa para diferentes aplicaciones e intereses. Esta información se puede obtener tanto a escala de rompiente, identificando los rangos de oleaje, viento y nivel del mar, en los cuales se generan olas adecuadas como a escala global, identificando las zonas con mayor potencial del planeta, y entendiendo cómo la disponibilidad de condiciones de surf fluctúa a lo largo del tiempo.

Ante la falta de metodologías que evalúen la ocurrencia de condiciones de surf como recurso natural susceptible de ser aprovechado, se han desarrollado una serie de índices que integran y califican los factores más relevantes en la experiencia del surf. Estos índices son conceptualmente una medida integrada que puede ser empleada

sistemáticamente en la evaluación de aquellos elementos meteo-oceanográficos más relevantes en la experiencia del surf para un surfista medio.

## 5.2. Planteamiento del problema, escalas espaciales

Las condiciones de surf pueden ser analizadas a diferentes escalas espaciales. Esta tesis está dedicada a las escalas global y regional, a pesar de ello, la escala local o de rompiente también ha de ser descrita, ya que introduce muchos de los conceptos que serán empleados posteriormente.

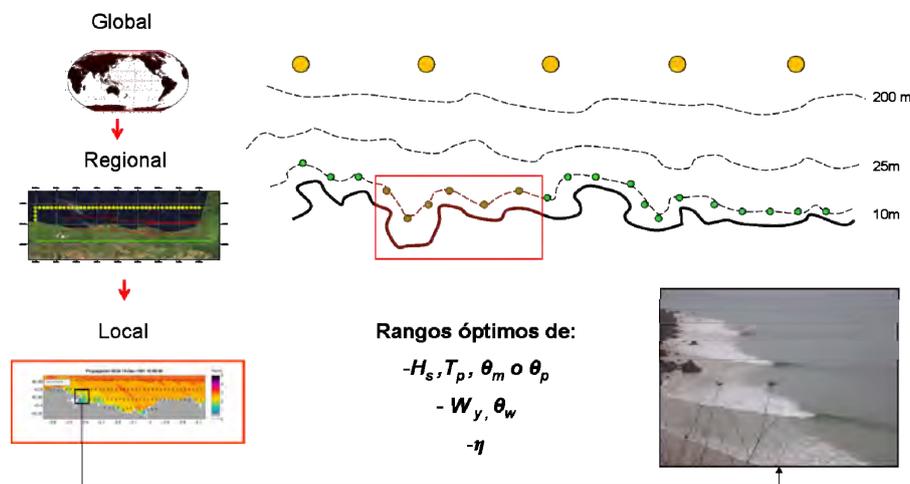


Figura 5.1. Escalas espaciales planteadas. Análisis global (puntos amarillos) y regional ( puntos verdes).

En la figura 5.1 se muestran las tres escalas espaciales planteadas. Si se parte de la escala de rompiente, las variables a analizar son aquellas que describen la energía del oleaje incidente ( $H_s$  y  $T_p$ ), la textura de la superficie del agua a través del viento en superficie ( $W$ ,  $\theta_w$ ), el grado de organización del estado de mar ( $\kappa$  y  $\sigma$ ), y el nivel del mar ( $\eta$ ). Algunas de estas variables pueden guardar cierta relación dependiendo del lugar geográfico, existiendo en la mayoría de los casos una alta variabilidad en la distribución conjunta de las mismas. En la rompiente de surf, es también muy importante la dirección del oleaje incidente ( $\theta$ ), este factor influye en el *peel angle* en rotura, de modo que en ángulo que forman los frentes de oleaje respecto al elemento batimétrico local también ha de estar dentro de unos límites. En estados de mar desarrollados, puede

asumirse que las olas mayores a  $H_s$ , inciden con la dirección asociada al periodo de pico,  $\theta_p$ .

El desarrollo de las técnicas y recursos computacionales en las últimas décadas, ha motivado el uso de modelos numéricos en el estudio de la transformación del oleaje en diferentes profundidades. Las ecuaciones que resuelven estos procesos son cada día más complejas tendiendo a relajar cada vez más las hipótesis de partida, produciendo resultados cada vez más realistas. Dentro de la variedad de ecuaciones resueltas por estos modelos que consideran los procesos de transformación del oleaje tales como refracción, difracción, asomeramiento y rotura, se encuentran dos grandes familias: los modelos integrados en la fase y los que resuelven la fase. Los primeros permiten la obtención de condiciones medias en una aproximación 2DH generalmente, en las que por la naturaleza de las ecuaciones se pierde la información de las olas individuales. Son válidos para calcular parámetros como el *peel angle* y la altura ola en rotura para distintas combinaciones de  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_p$  y  $\eta$ . Su menor carga computacional los hace útiles en muchas situaciones. Los modelos que resuelven la fase son computacionalmente más costosos, pero simulan la transformación de las ondas individuales, permitiendo muchas de las veces contemplar la transferencia no lineal entre las diferentes componentes frecuenciales del oleaje. Dentro de este campo encontramos tres familias: los modelos basados en las ecuaciones no someras de aguas profundas (*Non-linear Shallow Water Equations*, NLSW), los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq y los modelos que resuelven directamente las ecuaciones de Navier-Stokes. Los primeros, funcionan muy bien en zonas someras donde no hay dispersividad del oleaje. Los modelos basados en las ecuaciones de Boussinesq, tienden a ampliar el rango de aplicación de los modelos basados en las ecuaciones NLSW, permitiendo cierta dispersividad de las ondas individuales. Ambas aproximaciones, tienen un punto débil que se encuentra en el tratamiento de la rotura. Dichas ecuaciones no permiten el modelado de ésta, y la rotura y el posterior comportamiento de la ola se introducen en los modelos basados en formulaciones semi-empíricas de manera artificial. Los modelos que resuelven directamente las ecuaciones de Navier-Stokes son los que simulan de una manera más correcta el comportamiento del oleaje, debido a que son los únicos que resuelven la no linealidad y la alta dispersividad del mismo. La rotura se resuelve directamente debido a que estos modelos calculan el flujo desde una perspectiva

tridimensional. La turbulencia generada en rotura se modela basada en diferentes aproximaciones. Sin embargo, debido a su alta demanda computacional, solo pueden ser aplicados a dominios pequeños y para determinar ciertos aspectos específicos, como la forma de la ola en rotura y la deformación de la ola tras la rotura. La evaluación de las condiciones de surf a escala de rompiente, es un tema todavía por investigar, sin embargo la incorporación de una manera sencilla de físicas asociadas como el efecto del viento en la deformación de la ola, hacen que sean modelos con alto potencial de utilización en un futuro cercano, con una alta aplicabilidad en el diseño de arrecifes artificiales para el surf.

A escala regional, un análisis riguroso de las condiciones de surf permite estimar el tiempo aproximado que el oleaje presenta características adecuadas en una región determinada. De este modo, es posible identificar aquellas zonas donde el surf es más probable, o como las condiciones de surf cambian estacional o interanualmente. En un estudio regional, los criterios para evaluar los factores antes indicados deben ser más genéricos, aunque deben ajustarse al tipo de surf existente en la zona, lo cual exigen un profundo conocimiento de la geomorfología del lugar. En este caso, el análisis de las variables más relevantes puede ser llevado a cabo a pie de rompiente. Para ello es muy importante disponer de las características espectrales del oleaje en una posición cercana a la línea de rotura. El modelo SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*) desarrollado por *Delft University of Technology*, basado en la ecuación de acción de onda, permite trabajar con los espectros direccionales generados por el modelo global Wave Watch III. Además el modelo SWAN permite simular la generación de oleaje por viento local, que obviamente modificará la forma espectral de un estado de mar dado, y por tanto, su idoneidad para el surf. Al igual que con el oleaje, la orografía de la región puede generar zonas de sombra y concentración de vientos. En este sentido, disponer de una base de datos de alta resolución espacial y temporal, que resuelva fenómenos como las brisas térmicas o los cambios direccionales y en intensidad inducidos por el relieve, mejoraría la incertidumbre de la estima.

Una evaluación a escala global de las condiciones de surf resulta de gran utilidad en el ámbito del turismo internacional del surf. Analizar espacio-temporalmente las condiciones de surf en el planeta permite, tanto a los operadores turísticos, como al surfista de a pie, elegir el mejor destino global dependiendo de la época del año. Del

mismo modo, entender como la ocurrencia de eventos surfeables cambia entre unos años y otros, resulta también interesante desde un punto de vista teórico.

Gracias a la disponibilidad de un gran número de bases de datos de variables meteorológicas, fiables desde el punto de vista cuantitativo, largas en el tiempo y de cobertura global, no solo es posible evaluar las condiciones de oleaje en cualquier punto del planeta. Además, se dispone de otro tipo de información como la temperatura del agua, el nivel del mar, o la duración del día, factores que intervienen en la distribución efectiva del recurso surf. Al tratarse de modelos con dominio global, la resolución espacial obliga a asumir una serie de hipótesis y simplificaciones que serán descritas en el apartado siguiente.

### 5.3. Coastal Swell Index, $I_{CS}$

El  $I_{CS}$  se propone con el objetivo de caracterizar la probabilidad de que un estado de mar tipo *swell* o *windswell* produzca olas surfeable. Este índice ha sido elaborado en base al compromiso entre la cantidad de información que es posible incorporar en una sola variable y de la que es posible disponer a las distintas escalas espaciales de análisis.

El término surfeabilidad hace referencia tanto al porcentaje de tiempo que una determinada rompiente ofrece olas surfeables como a la calidad de las mismas, (Pattiaratchi *et al.*, 1997; Bancroft, 1999; Hutt y Black, 2001; Dally, 2001). Mead, (2004), considera que para que una ola sea surfeable debe tener al menos 0.5 m de altura y un periodo superior a los 6-7 segundos, aunque para que la ola sea de cierta calidad debe tener al menos entre 1 y 2 metros de altura y un periodo superior a los 10 segundos. En la figura 5.2 se muestra un ejemplo de olas de calidad alta, de tamaño entre 1.5 y 2.5 m, generadas por la tormenta extratropical Abby en el Hemisferio Sur entre los días 8 y 20 de Junio de 2010. En sentido horario y comenzando en la esquina inferior izquierda, las localizaciones son: Sudáfrica, Indonesia, Australia y Polinesia Francesa.



Figura 5.2. Ejemplo de oleajes de alta calidad, fuente: [www.surflines.com](http://www.surflines.com).

Este apartado trata de evaluar la probabilidad de que un estado de mar genere olas como las que se muestran en la figura 5.2. Puesto que no todos los estados de mar son aptos para el surf, se han establecido tres preceptos básicos que diferencian aquellos que son aptos para el surf de los que no lo son. En una primera aproximación, puede decirse que son condiciones necesarias o suficientes de cumplimiento simultáneo:

- Un estado de mar es apto para el surf si supera un umbral mínimo en la altura de ola,  $H_s > 0.5 - 1$  m.
- Un estado de mar es apto para el surf si supera un umbral mínimo en el periodo de pico,  $T_p > 7$ s.
- Una condición fundamental que mejora la calidad del surf es que el oleaje se encuentre fuera de la zona de influencia del viento o zona de generación, es decir que sean oleajes tipo *swell* (o mar de fondo). El grado de desarrollo o edad del estado de mar puede ser estimado mediante los parámetros  $\kappa$  y  $\sigma$  (ver capítulo 2).

En los estados de mar tipo *swell*, el oleaje se propaga agrupado en trenes de ondas cuyas crestas, prácticamente paralelas, pueden alcanzar longitudes de varios kilómetros. El

*swell* es generalmente de periodos mayores que el mar de viento, su espectro característico suele ser estrecho tanto en frecuencias como en direcciones (Holthuijsen, 2007). En la naturaleza pueden generarse oleajes tipo *swell* debido a dos causas bien diferentes:

- Un primer motivo basado en la definición misma de *swell*. Es decir que el oleaje haya obtenido la entidad suficiente para propagarse fuera de la acción del viento. En este caso la distancia que el oleaje recorre desde que deja el área de generación hasta incidir en la costa es el factor más importante que gobierna el grado de organización del oleaje. Debido a la acción de los fenómenos físicos de dispersión radial y frecuencial, interacciones no lineales ola a ola y disipación de energía por fricción, el oleaje, en su origen caótico, se transforma en un oleaje de crestas largas, aumentando el periodo del mismo y disminuyendo en altura.
- Un segundo motivo, éste de carácter más local, ocurre cuando la zona de generación se encuentra muy próxima al contorno de costa. En esta ocasión, debido a los procesos de refracción y difracción, pueden producirse cambios en la dirección de propagación que hagan que las olas se propaguen en dirección contraria al viento que las ha generado. Los fenómenos de refracción y difracción son dependientes del periodo del oleaje, por ello, son fenómenos que filtran las altas frecuencias permitiendo solo a las más bajas y, por tanto, las más energéticas llegar a las partes más protegidas de la costa.

En la figura 5.3 se muestra una de las rompientes con más tradición en el estado de Nueva Gales del Sur en Australia, *Lennox Head*. En sentido horario, se pueden observar: (a) condiciones no aptas para el surf, por carecer éste de la energía mínima necesaria, (b) oleaje surfeable pero de mala calidad, al ser éste demasiado pequeño y estar afectado negativamente por la acción del viento, (c) un estado de mar surfeable pero de calidad baja, a pesar de ser de un tamaño considerable, se observar como las crestas no son tan largas como en la imagen anterior. Por último, (d) oleaje de un tamaño ideal para el surf con crestas muy largas y viento *offshore*.



Figura 5.3. Diferentes grados de calidad del oleaje en *Lennox Head National Surfing Reserve*.

### 5.3.1. Variables involucradas

Para la mayoría de las aplicaciones en ingeniería de costas, el oleaje queda descrito mediante los parámetros  $H_s$ ,  $T_m$ ,  $T_p$  y  $\theta_m$  o  $\theta_p$ , conocidos como parámetros espectrales del oleaje (Capítulo 2). Como se explicó en el apartado 5.2, la operatividad de una rompiente puede ser estimada calculado el tiempo, en el cual, las variables que describen el oleaje, el viento y el nivel del mar se encuentran dentro de unos rangos que vienen dados por las características topo-batimétricas de la misma. Estos rangos se hacen más genéricos a medida que disminuye la resolución del análisis. Por este motivo, para evaluar la ocurrencia de eventos surfables a distintas escalas, no siempre se emplean ni el mismo tipo de variables, ni de criterios.

Para estimar la capacidad de un oleaje de producir olas surfables, la primera condición es que este contenga una energía mínima. La energía de un estado de mar es proporcional a  $H_s^2 T_p$ . El  $T_p$  se relaciona, además, con el grado de organización del

estado de mar, de modo que periodos altos se asocian a mares muy ordenados. Sin embargo, para un periodo dado, pueden ser encontrados en la naturaleza diferentes grados de organización y desarrollo, ya que es necesario disponer de otro tipo de variables que aporten información más precisa acerca las características espectrales. Una primera aproximación es consultar el viento asociado en mar abierto. Tanto la velocidad del viento, como su dirección, pueden informarnos de cómo de ordenado puede llegar a incidir el oleaje en una rompiente. En este sentido, vientos procedentes del mar generan una estructura caótica de la superficie, mientras que vientos de tierra mejoran la calidad del oleaje incidente. Ésto se ve reflejado en las características espectrales del oleaje, ya que el viento a cierta distancia de la costa aporta o resta energía en las altas frecuencias, afectando al parámetro de forma espectral,  $\kappa$ , descrito en el Capítulo 2. Del mismo modo, dependiendo de la dirección del viento, las altas frecuencias generadas viajaran en una u otra dirección, afectado al parámetro de dispersión direccional,  $\sigma$ .

Si en lugar del viento en mar abierto se dispone del viento en la costa, la estima de la calidad de las condiciones de surf puede ser mejorada. El viento en la costa define la textura del estado de mar. Imaginémonos una situación en la que incide un *swell* con un alto nivel de desarrollo, en ausencia de viento en mar abierto. Este estado de mar se propaga hasta la costa sin ningún aporte extra de energía del viento. En la costa, las diferencias de temperatura entre el mar y la tierra generan un viento suave, o brisa, con dirección mar-tierra. La frecuencia de las olas generadas por este viento no superan los  $0.5 \text{ s}^{-1}$ , sin embargo, éstas son capaces de alterar drásticamente la calidad de las olas para el surf. En la tabla 5.1 se muestran las variables propuestas para analizar los tres aspectos básicos que describen la calidad del oleaje en las tres escalas planteadas.

	Energía	Grado organización	Textura
Global	$H_s^d, T_p$	$T_p, W^d, \theta_w^d$	
Regional	$H_s^c, T_p$	$T_p, \kappa^c, \sigma^c$	$W^c, \theta_w^c$
Local	$H_s^c, T_p, \theta_p^c$	$T_p, \kappa^c, \sigma^c$	$W^c, \theta_w^c$

Tabla 5.1. Variables para evaluar los diferentes aspectos que rigen la calidad de las condiciones de surf.

Los superíndices  $d$  (deep water) y  $c$  (costa) indican la posición donde es conocido el viento.

A continuación se describen los criterios necesarios para estimar la calidad del *swell* en la escala global y regional.

### 5.3.2. Criterios para el cálculo de $I_{cs}$

A continuación se detallan los índices de altura de ola, periodo, viento y forma espectral a partir de los cuales se determina  $I_{cs}$ .

#### 5.3.2.1. Evaluación del efecto de la altura de ola significativa, $I_{Hs}$

La altura de ola significativa  $H_s$  o  $H_{m0}$ , definida como la media aritmética del tercio mayor de las olas que componen un estado de mar, juega un papel determinante en la disponibilidad del recurso surf. Por motivos físicos, resulta imposible para un ser humano deslizarse por la superficie del agua impulsado por una ola si ésta es demasiado pequeña. El parámetro  $H_s$  en mar abierto, además de orientar al surfista sobre la altura de ola que puede encontrar en la playa, indica la energía del estado de mar incidente, haciendo que este busque rompientes expuestas en días poco energéticos y más abrigadas cuando se alcancen alturas de ola suficientemente grandes. Sin embargo, superado cierto umbral en la altura de ola, la probabilidad de encontrar una rompiente funcionando disminuye. Así, en un tramo costero determinado, es más probable encontrar un alto número de rompientes funcionando cuando la altura de ola en las proximidades de la costa se encuentra dentro de unos rangos definidos.

Hutt (2001), investigó sobre las relaciones existentes entre el ángulo de rotura, la altura de ola y el nivel de destreza del surfista obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 2.1 del Capítulo 2. De los 8 niveles que establece Hutt, del 1 a 5 corresponden a niveles en los que se encuentra el 90% de las personas que practican este deporte. Éstos, en su mayoría, prefieren estados de mar con alturas de olas entre 0.5 m y 2.5 m, aunque los más avanzados pueden surfear en estados de mar con alturas de ola de hasta 4 m. Del nivel 6 en adelante, corresponde a nivel profesional o semiprofesional. Éstos son capaces de surfear en un amplio abanico de condiciones, desde olas muy pequeñas donde un surfista medio no sería capaz de impulsarse, hasta olas descomunales donde el límite viene impuesto por la velocidad que es capaz de alcanzar el surfista para coger la ola.

En la figura 5.4 se muestran dos ejemplos de buenas condiciones de surf cuya principal diferencia es el tamaño del oleaje, la imagen de la izquierda corresponde a un *swell* de  $H_s \approx 2$  m rompiendo sobre un arrecife en Indonesia y la imagen de la derecha corresponde a la famosa ola de Mavericks en California, con  $H_s \approx 5$  m. Ambas situaciones son surfeables, sin embargo, al calificar  $H_s$  debe establecerse un límite superior ya que muy pocos surfistas son capaces de disfrutar en condiciones muy energéticas, debido al nivel de destreza exigible y a la peligrosidad que entrañan este tipo de oleajes.



Figura 5.4. Bawa en las islas Mentawai (izquierda), y Mavericks en California (derecha). Fuente: [www.surfersvillage.com](http://www.surfersvillage.com).

Lógicamente no todos los estados de mar en profundidades indefinidas producen la misma altura de ola en las proximidades de la costa. A medida que el oleaje se aproxima, el efecto del fondo empieza a hacerse palpable. Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el oleaje se transforma (ver Capítulo 2). Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en variaciones de la altura de ola y en la dirección de propagación. Los fenómenos más importantes que sufre el oleaje cuando se acerca a la costa son: la refracción y el asomeramiento, debido a la batimetría y las corrientes; la difracción, como consecuencia de la presencia de cabos o islas y la pérdida de energía debido a la disipación con el fondo o fricción con el viento. Es por tanto la batimetría y la orientación de la costa respecto a los oleajes incidentes la que condiciona los fenómenos más relevantes que sufre el oleaje.

En la escala global, las dimensiones del problema no permiten considerar los aspectos locales en la propagación. Por tanto, asumiendo que hasta la profundidad objetivo (25 m), los cambios en el oleaje son producidos fundamentalmente por refracción y asomeramiento, bastará con resolver estos fenómenos para conocer con mayor detalle

las características del oleaje en las inmediaciones de la costa. Al asumir batimetría recta y paralela, los procesos planteados pueden ser resueltos mediante la aplicación de ecuaciones sencillas cuyo coste computacional es mínimo. La Ley de Snell es aplicable a la refracción de cualquier tipo de ondas, tiene su origen en el campo de la óptica y relaciona los cambios en la dirección con los cambios en la celeridad de la onda, y por tanto con la amplitud. Una vez es conocida la serie de  $H_s$  a una profundidad de 25 m, se asume que en la mayoría de rompientes las olas serán de un tamaño similar, a no ser que la misma se encuentre muy girada respecto a la orientación media del tramo costero, situación en la cual, el oleaje incidirá demasiado debilitado.

Descripción	$H_s$ (m)	$I_{H_s}$ rating
La mayoría de los <i>spots</i> están en calma	<0.5	0
La mayoría de los <i>spots</i> presentan olas pequeñas.	0.5-1	5
Sólo los <i>spots</i> más expuestos presentan olas surfeables.	1-1.5	7.5
La mayoría de los <i>spots</i> presentan olas surfeables	1.5-5	10
Sólo los <i>spots</i> más protegidos presentan olas surfeables.	>5	5

Tabla 5.2. Escala para la evaluación de  $H_s$  en la escala global.

Teniendo en cuenta los trabajos de Hutt en 2001, se ha evaluado el parámetro  $H_s$  mediante la escala que se muestra en la tabla 5.2. El criterio establece, que si la altura de ola frente a la costa se encuentra entre  $1.5 \text{ m} \leq H_s \leq 5 \text{ m}$ , la posibilidad de encontrar una rompiente con olas de un tamaño idóneo es muy elevada. Según este criterio, alturas de ola inferiores a 1 m obtienen calificación inferior al 5, lo cual indica que por debajo de este umbral la probabilidad de ocurrencia de oleajes surfeables es muy escasa. La falta de energía del oleaje condiciona evidentemente las posibilidades de encontrar zonas lo suficientemente expuestas para que en ellas se produzcan olas surfeables. Del mismo modo, al superarse el umbral de altura de ola de 5 m, la probabilidad de que se produzcan olas surfeables comienza a decrecer, ya que resulta complicado encontrar una rompiente lo suficientemente protegida. Aun así, a pesar de ser poco probable, se

evalúa con  $I_{H_s}=5$  a aquellos estados de mar con  $H_s > 5$ , puesto que en todo momento se cumple la condición energética mínima.

Para ilustrar la parametrización aplicada a la altura de ola significativa en la escala global, se muestra el ejemplo de la figura 5.5, donde se ha aplicado el criterio para el cálculo de  $I_{H_s}$  (horario) en un punto del Cantábrico con orientación norte ( $\beta = 0^\circ$ ) del 15 al 30 de Septiembre de 2006. La altura de las barras representa a  $I_{H_s}$ ,  $T_p$  viene indicado por el color, los vectores indican  $\theta_p$ , la línea azul muestra  $H_s$  en indefinidas y la línea negra  $H_s$  propagada a una profundidad de 25 m.

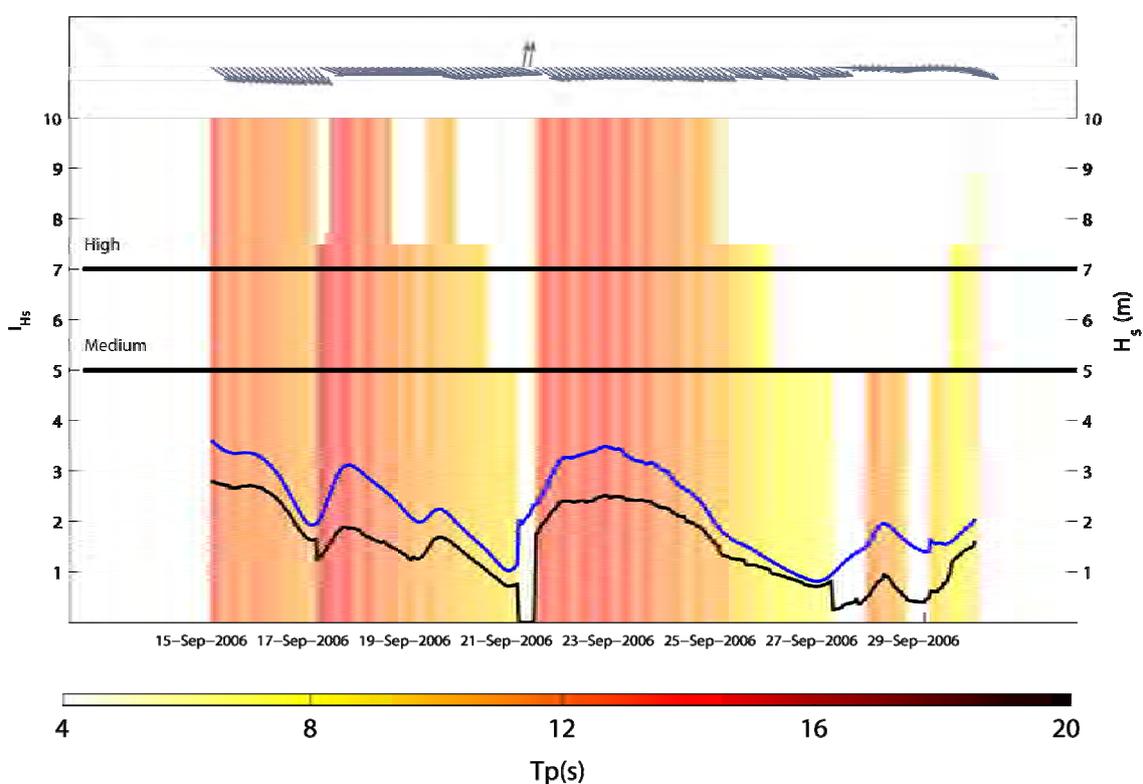


Figura 5.5. Parametrización aplicada a  $H_s$ . Altura de las barras,  $I_{H_s}$ , línea azul,  $H_s$  en profundidades indefinidas, línea negra  $H_s$  propagada y vectores  $\theta_p$ . Los colores indican el valor de  $T_p$ .

Nótese que para una altura de ola dada en indefinidas no siempre se obtiene la misma calificación en la costa, puesto que  $T_p$  y  $\theta_p$  condicionan la propagación de cada estado de mar. En el gráfico se establecen dos umbrales en  $I_{H_s}=5$  y en  $I_{H_s}=7$ , diferenciando respectivamente entre condiciones medias y óptimas de calidad del oleaje.

A medida que se aumenta la resolución del análisis (*downscaling*), la evaluación de este parámetro, requiere el empleo de un criterio más restrictivo que se ajuste a las características del tipo de rompiente predominante en la zona. Por ejemplo, si se pretende analizar una zona donde la tipología de rompiente más frecuente es tipo *beach break*, la altura de ola máxima surfeable difícilmente superará los 2 m. Si por el contrario se pretende analizar una zona con dominancia de rompientes tipo *reef break*, tanto el umbral mínimo como el máximo deberán ser incrementados. De esta forma, la metodología de evaluación se ajusta a las características morfológicas regionales. En el análisis regional de las condiciones de surf realizado en el capítulo 6, el criterio empleado para evaluar  $H_s$  se muestra en la tabla 5.3. Nótese en este caso como la calificación ya no esta basada en la proporción de rompientes potencialmente funcionales en base a la altura de ola conocida en un punto exterior representativo. En la escala regional, cada punto analizado representa un *spot*, así el criterio evalúa la idoneidad (para la mayoría de surfistas) del tamaño de las olas en función de  $H_s$  conocida al pie de la rompiente.

Descripción	$H_s$ (m)	$I_{H_s}$ rating
Olas muy pequeñas	<0.5	0
Olas pequeñas	0.5-1	5
Olas de tamaño óptimo	1-2	10
Olas grandes	2-2.5	7.5
Olas muy grandes	2.5-3	5
Olas demasiado grandes	>3	0

Tabla 5.3. Escala para la evaluación de  $H_s$  en la escala regional.

### 5.3.2.2. Evaluación del efecto del periodo de pico, $I_{Tp}$

El periodo de pico,  $T_p$  aporta información relativa a la longitud de onda y, por lo tanto, del nivel de desarrollo y energía del estado de mar. En la literatura especializada se considera que el umbral mínimo que diferencia si un estado de mar es surfeable ronda

los 7 s. Estados de mar cuyo periodo está comprendido entre 7 y 10 s son denominados *windswells* o mar de viento, mientras que estados de mar cuyo  $T_p > 10$  s son denominados *groundswells* o mar de fondo (Butt, 2002).

El parámetro  $T_p$  también aporta información relativa a la longitud del frente de onda característica de un estado de mar. Periodos pequeños se caracterizan por presentar crestas cortas longitudinalmente, mientras que periodos grandes pueden producir frentes de onda superior a los 8 km. En la figura 5.6 se muestran dos estados de mar de igual  $H_s$  y forma espectral pero con  $T_p$  de 15 s en el panel izquierdo y 6s en el derecho.

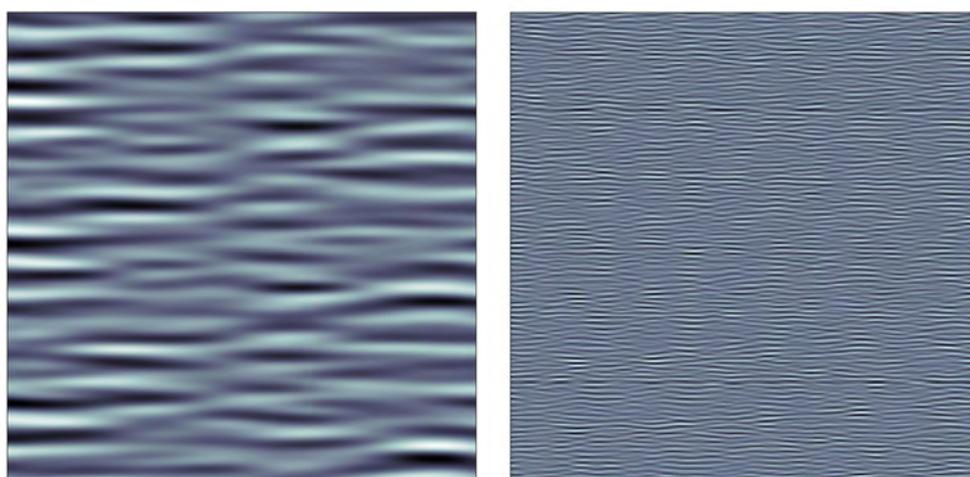


Figura 5.6. Superficie libre de estados de mar de igual  $H_s$  con  $T_p=15$  s (panel izquierdo) y  $T_p=6$  s (panel derecho), área=25 km<sup>2</sup>.

Este parámetro también informa al surfista sobre qué tipo de rompiente ha de elegir, estados de mar de periodo pequeño suelen producir mejores olas en playas que en arrecifes, que por lo general producen olas de mayor calidad, pues las irregularidades batimétricas en un fondo arenoso no alcanzan gradientes tan elevados como los fondos rocosos o coralinos, haciendo que el frente de las ondas de periodo alto rompa simultáneamente (*close out*), perjudicando la calidad del surf. Este hecho condiciona la evaluación de la variable en cuestión, pues estados de mar con periodos relativamente pequeños pueden dar lugar a condiciones de surf excelentes al incidir sobre un fondo adecuado. Por otro lado, periodos muy pequeños pueden asociarse con estados de mar tipo *sea*, caracterizados por no poseer en su estructura un patrón que favorezca la práctica del surf. En definitiva, puede decirse, que para una misma altura de ola, el estado de mar tendrá más probabilidad de producir olas surfeables a medida que mayor

sea el periodo de pico. Del mismo modo, la calidad de las olas tiende a mejorar a medida que se incrementa el valor de este parámetro (Butt, 2002). Así, este criterio no requiere ser modificado en función de la escala del análisis, el principal motivo radica en que la variabilidad espacial (a pequeña escala) de  $T_p$  es mucho menor que la de  $H_s$ .

A escala global, cada punto donde es realizado el análisis representa un amplio abanico de orientaciones de rompiente (ver figura 5.1). Evaluar positivamente aquellos oleajes que, en profundidades indefinidas, presentan periodos de pico elevados, es justificable debido a la mayor capacidad de refractar y girar que estos tienen. Por tanto, para una misma altura de ola en mar abierto, el número de rompientes operativas se incrementa a medida que aumenta  $T_p$ . En la tabla 5.4 se muestra la escala utilizada para evaluar el  $T_p$ , tanto en el análisis global como regional. Nótese que la calidad del oleaje aumenta exponencialmente a partir de  $T_p=6$  s, llegando a la calificación de  $I_{T_p}= 5$  con  $T_p=8$  s. A partir de este valor, la calidad del estado de mar crece hasta  $T_p=14$  s, a partir del cual se puede decir que la calidad del estado de mar es máxima.

Descripción	$T_p$ (s)	$I_{T_p}$ rating
No surfeable	<6	0
Surf de mala calidad	6-8	2.5
Puede generar olas de buena calidad en <i>beach breaks</i> expuestos	8-10	5
Puede generar olas de buena calidad en <i>beach</i> y <i>point breaks</i> expuestos	10-14	7.5
Puede generar olas de buena calidad en <i>reef</i> y <i>point breaks</i> . Los <i>beach breaks</i> tienen a cerrar.	>14	10

Tabla 5.4. Escala para la evaluación de  $T_p$ .

Para integrar el efecto del  $T_p$  en la calidad del *swell* se calcula la media aritmética entre las puntuaciones obtenidas por  $H_s$  y  $T_p$ . Sin embargo, si  $T_p < 6$  s o  $H_s < 0.5$  m, se obliga a que el valor de la media sea igual a 0.

Para ilustrar el efecto del  $T_p$  en la calidad del *swell*, se muestra la figura 5.7, en la cual se han aplicado los criterios de evaluación en el mismo punto de la figura 5.5. Las barras

representan el valor de  $[I_{H_s}+I_{T_p}]/2$ , los vectores indican la dirección del mar incidente ( $\theta_p$ ), la línea de color negro muestra la evolución de  $H_s$  en la costa y la línea punteada azul representa la calificación  $I_{H_s}$ . Nótese como al evaluar la calidad del oleaje según la media aritmética entre  $I_{H_s}$ , e  $I_{T_p}$ , se consigue aumentar la calidad de aquellos estados de mar de menor altura que incidan con periodos altos. Por el contrario se perjudica la evaluación de estados de mar de mayor altura que inciden con periodos pequeños. En esta figura también es posible observar como en ausencia de viento, la calidad del oleaje es máxima con la llegada del *swell* (periodos altos), mientras que esta desciende a medida que disminuye el  $T_p$ .

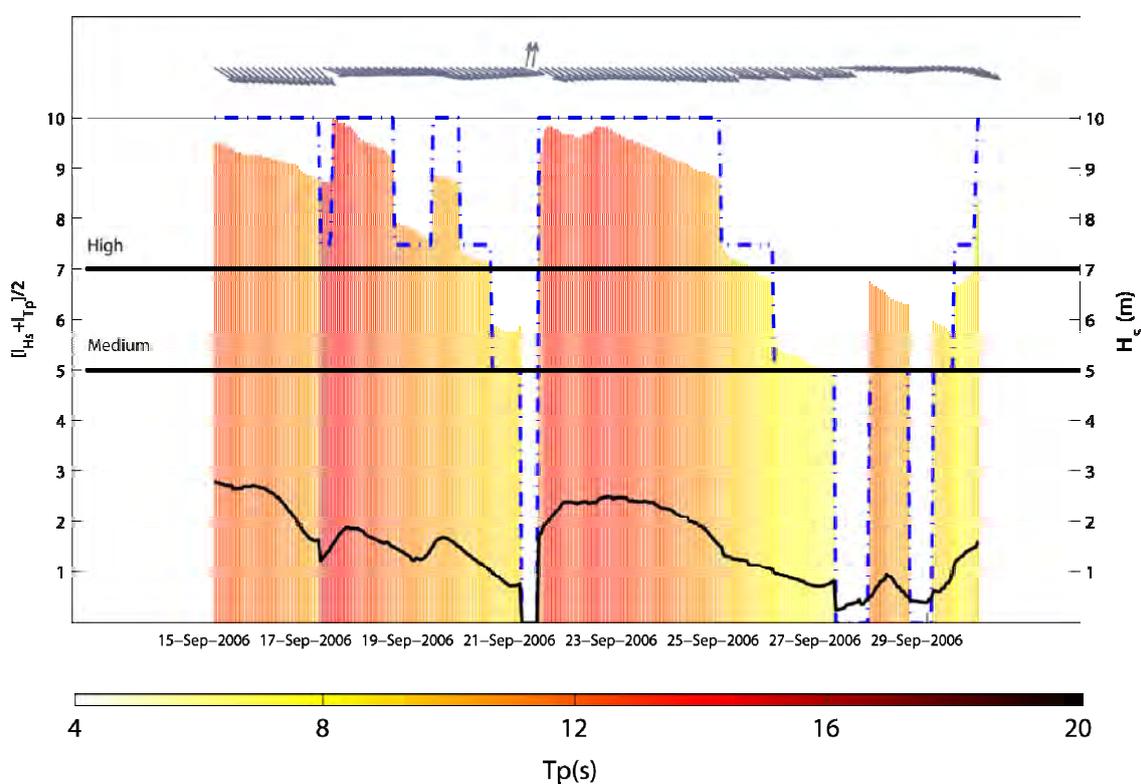


Figura 5.7. Efecto de  $T_p$  en la calidad del oleaje. Altura de las barras,  $[I_{H_s}+I_{T_p}]/2$ , línea negra  $H_s$  propagada, línea azul punteada,  $I_{H_s}$  y vectores  $\theta_p$ . El color indica el valor de  $T_p$ .

### 5.3.2.3. Evaluación del efecto del viento, $I_W$

El viento en cualquier instante queda definido por su velocidad,  $W$  y su dirección,  $\theta_w$ . Éste ejerce un efecto casi inmediato sobre la superficie del mar: vientos suaves apenas agitan la superficie, mientras que vientos intensos son capaces de generar grandes olas. A escala de rompiente, el viento es un factor casi tan determinante como  $H_s$  o  $T_p$ . Éste,

aun siendo suave, es capaz de generar ondulaciones de cierta magnitud que pueden alterar drásticamente la calidad de un estado de mar. Las mejores condiciones posibles se producen siempre en ausencia de viento o cuando éste sopla *offshore*, en dirección tierra agua, también conocido como viento terral. La calidad del surf disminuye a medida que la dirección del viento se aproxima a la dirección agua tierra, *onshore*, o viento de mar. Así, asumiendo que las olas llegan con sus frentes prácticamente paralelos a la línea de costa debido a la refracción, en un tramo con una orientación dada, la posibilidad de encontrar una rompiente con condiciones ideales de viento será mayor siempre con viento terral que de mar.



Figura 5.8. Ejemplo de dos condiciones de oleaje similar en Bells Beach, Australia. Viento *onshore* (izquierda) y *offshore* (derecha).

En la figura 5.8 se muestran dos condiciones de oleaje similares en la famosa rompiente de Bells Beach, Australia. En la imagen de la izquierda se puede apreciar como el viento de mar modifica la geometría de la ola, haciendo que ésta rompa con menos peralte, inestable, provocando la rotura irregular del frente, en definitiva, haciendo que la rotura sea menos predecible. En la imagen de la derecha, el viento terral aumenta la estabilidad de la ola permitiendo al surfista hacer un recorrido más largo, realizando las maniobras con mayor comodidad, ya que la evolución del punto de rotura es constante.

A pesar de la clara influencia del viento a escala de rompiente (ver Capítulo 2), a escala global puede aportar otro tipo de información relativa a las características del estado de mar. Vientos intensos que soplan en la misma dirección de propagación del oleaje, indican estados de mar tipo *sea*, por el contrario, si la velocidad del viento es muy

pequeña o su dirección es contraria a la de propagación del oleaje, el estado de mar puede ser identificado como tipo *swell*.

Una forma práctica de tener en consideración todos los aspectos descritos es evaluar conjuntamente  $W$  y  $\theta_w$ . Para ello se ha tomado como referencia el criterio de vientos aplicado por Mead (2005) para el diseño y construcción de arrecifes artificiales, figura 5.9. Este criterio, a pesar de haber sido diseñado para una escala local, puede ser aplicado en la escala global al ampliar los rangos direccionales.

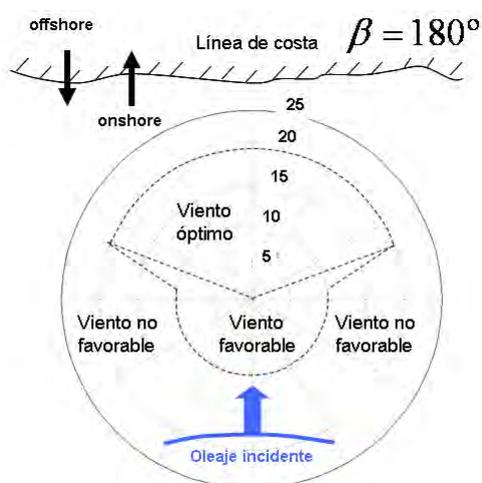


Figura 5.9. Criterio de surfeabilidad referido al viento para una playa determinada, la velocidad del viento viene dada en m/s (adaptación de Mead (2005), Boscome Reef Report).

Mead diferencia dos clases de viento según su velocidad y dirección, siendo  $\beta$  la orientación de la costa, son vientos favorables aquellos que encuentran en un rango de direcciones de  $\beta - 112.5^\circ < \theta_w < \beta + 112.5^\circ$  y de velocidades de viento de  $0 \text{ m/s} \leq W < 20 \text{ m/s}$ , el resto de direcciones de viento resultan ser poco favorables.

De la modificación y extensión de este criterio para su aplicación en el  $I_{cs}$  a escala global, se ha diseñado la escala direccional (0-1) que se muestra en la figura 5.10. Vientos cuya velocidad sea inferior a 3 m/s (fuerza 2 en la escala Beaufort) obtienen la puntuación máxima, ésta es aplicable a velocidades de hasta 20 m/s (fuerza 8) para vientos *offshore*. La puntuación mínima,  $I_w=0$ , se obtiene para vientos *onshore* cuando  $W \geq 20 \text{ m/s}$  (fuerza 8), y para vientos *offshore* cuando  $W > 30 \text{ m/s}$  (>fuerza 9), aunque el efecto del viento terral comienza a ser negativo para el surf a partir de los 20 m/s (fuerza 8).

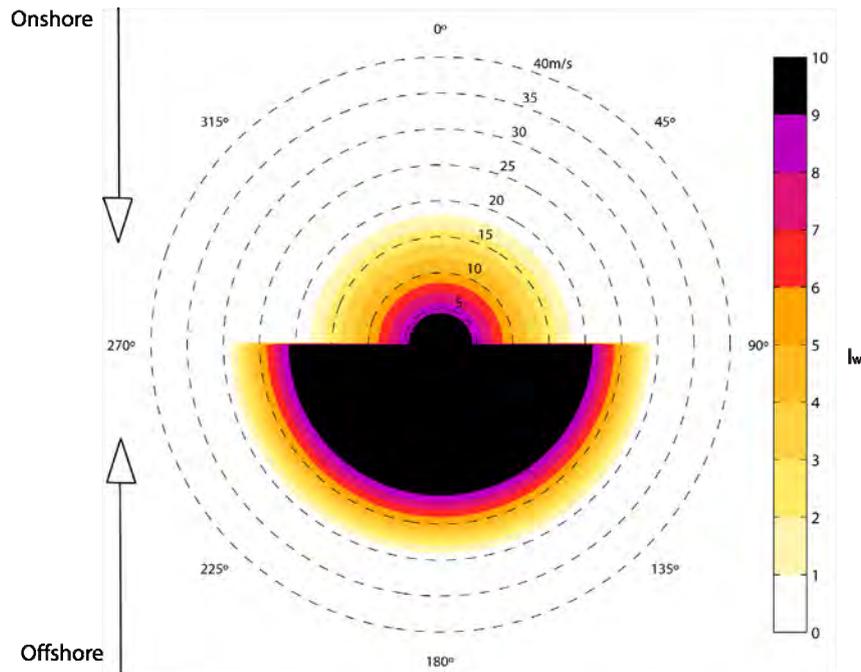


Figura 5.10. Criterio para la evaluación de las condiciones de viento en la escala global,  $\beta = 0^\circ$ .

Evaluar las condiciones de viento siguiendo una escala de 0 a 1 permite integrar el efecto que este factor ejerce en la probabilidad de ocurrencia de condiciones de surf. Así, en aquellos instantes en los que la calificación obtenida por el viento sea la máxima,  $I_w=1$ , la calidad del oleaje no se verá afectada. Por el contrario, si la puntuación alcanzada por  $I_w$  es inferior a la unidad, el efecto del viento comienza a ser negativo. En la figura 5.11 se muestra el efecto que el viento ejerce en la calidad del oleaje en un tramo con orientación norte ( $\beta = 0^\circ$ ). En ella se ha representado la calificación de  $I_{cs}$  mediante un gráfico de barras, en las que el color indica el valor de  $T_p$ , los vectores representan la dirección y velocidad del viento (escala de grises), la línea punteada azul muestra la calificación obtenida sin considerar el viento y la línea negra representa a  $H_s$ . Nótese como al contrario que  $T_p$  cuyo efecto podía ser positivo o negativo, el efecto del viento solo puede ser neutral o negativo.

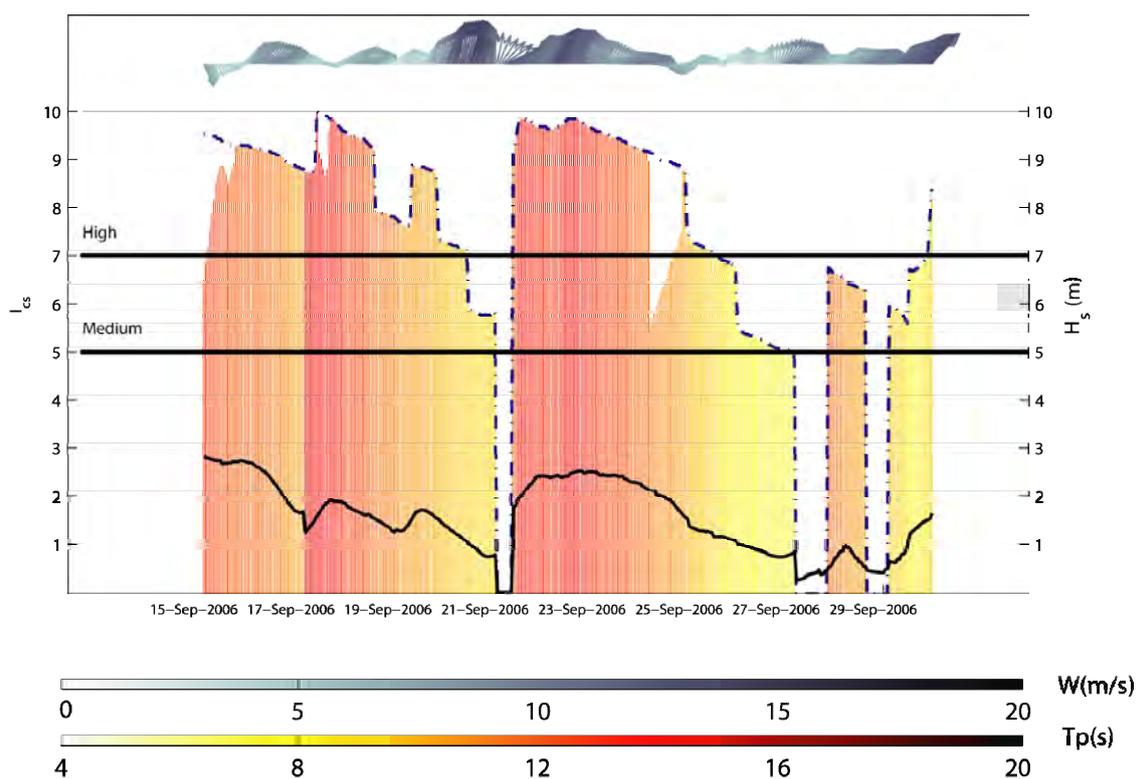


Figura 5.11. Efecto del viento en la calidad del oleaje.

Al observar la figura, se puede apreciar como para el punto analizado, los vientos de mar moderados ocurridos alrededor del 15 de Septiembre disminuyeron la calificación del  $I_{cs}$  de 9.5 a 6.5, perjudicando drásticamente la calidad del oleaje. Sin embargo, el viento terral suave (SSW) ocurrido el 23 de Septiembre permitió la incidencia de un *swell* de buena calidad, siendo durante estos días muy probable la ocurrencia de buenas condiciones de surf en la zona representada por el punto analizado.

Al igual que sucede con la altura de ola, dependiendo de la resolución espacial del análisis, el criterio de vientos puede ser más o menos restrictivo. En la figura 5.12 se muestra el criterio de vientos empleado en el análisis regional realizado en el Capítulo 6.

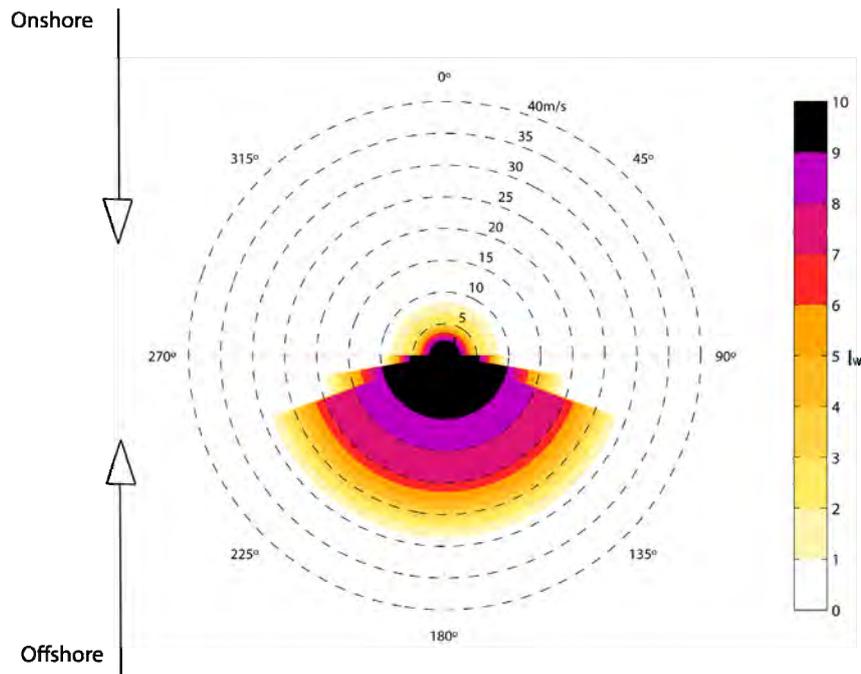


Figura 5.12. Criterio para la evaluación de las condiciones de viento en la escala regional,  $\beta = 0^\circ$ .

#### 5.3.2.4. Evaluación del efecto de la forma espectral, $I_{SQI}$

El  $I_{SQI}$ , o *Swell Quality Index* es un subíndice que se propone para evaluar el grado de organización de un estado de mar en la escala regional del análisis. En el Capítulo 2 se puso de manifiesto la importancia de la forma espectral en la calidad del oleaje para el surf. El espectro contiene una gran cantidad de información, por lo que trabajar directamente con este formato de datos puede suponer un gran coste computacional. Para ello, se ha optado por analizar los parámetros de forma espectral,  $\kappa$  y de dispersión direccional,  $\sigma$  para estimar la calidad del *swell*. Para un oleaje con una altura y periodo dados, la calidad del mismo aumentará a medida que se incrementa el valor de  $\kappa$  y disminuye el de  $\sigma$ .

Como el grado de organización del *swell* está íntimamente ligado al valor que toman estos parámetros., para obtener los criterios con los que otorgar un valor de calidad en función de  $\kappa$  y  $\sigma$ , se realizaron un conjunto de N=223 encuestas en las que se mostraban distintos estados de la superficie libre del mar. De esta manera, los encuestados tenían que otorgar una calidad a cada uno de ellos. La superficie libre del

mar era obtenida a partir de espectros JOSWAP con  $H_s=2m$ ,  $T_p=12s$  y con diferentes valores de  $\kappa$  y  $\sigma$  (ver figura 5.13).

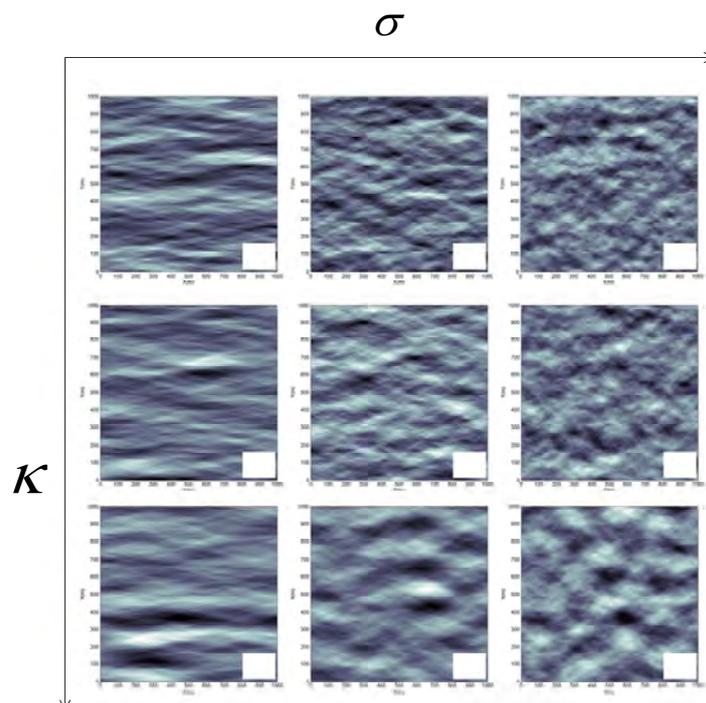


Figura 5.13. Encuesta realizada para obtener los criterios de evaluación de  $\kappa$  y  $\sigma$ . En los huecos se evalúa de 0 a 10 la calidad del estado de mar.

Los resultados obtenidos a través del cuestionario fueron ajustados a una superficie cuadrática, tal y como se muestra en la figura 5.14

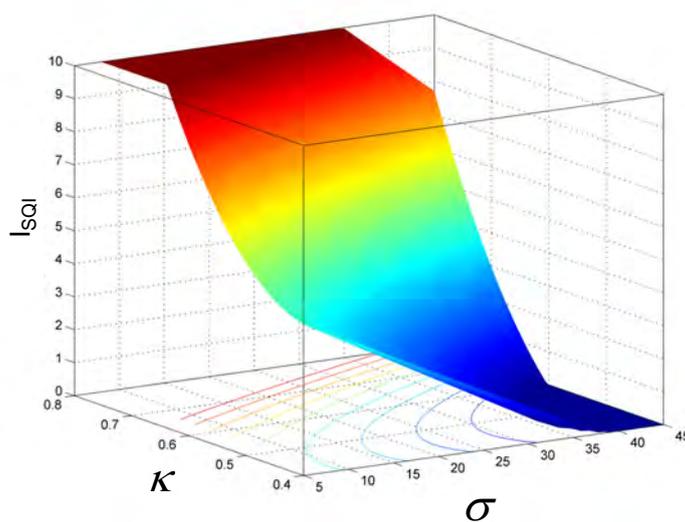


Figura 5.14. Criterio de evaluación de  $\kappa$  y  $\sigma$ .

Así, una vez obtenida la expresión que describe la superficie calculada, la obtención de la puntuación de  $I_{SQI}$  es inmediata.

$$I_{SQI} = 20.29 - 0.0513\sigma - 72.045\kappa - 0.24\kappa\sigma + 0.0002\sigma^2 + 86.85\kappa^2 \quad (0 \leq I_{SQI} \leq 10) \quad (5.1)$$

El subíndice  $I_{SQI}$  se propone como un factor condicionante, es decir, valores bajos de calidad del *swell* nunca pueden limitar la disponibilidad de condiciones de surf, ya que estas vienen dadas por los subíndices  $I_{Hs}$ ,  $I_{Tp}$  e  $I_w$ . Por este motivo, el valor de  $I_{SQI}$  se ha normalizado en una escala que oscila entre 0.75 y 1. De tal manera que aquellos estados de mar surfeables, con escaso grado de organización, vean mermada su calidad respecto a aquellos que inciden en la costa en estadios de mayor desarrollo.

El *Swell Quality Index* es sólo empleado en la escala regional del análisis, ya que su aplicación en profundidades indefinidas carece de sentido. Este adquiere mayor significado al ser evaluado a escasa profundidad, donde los procesos en la propagación del oleaje generan diferencias notables en la calidad del mismo.

### 5.3.3. Cálculo de $I_{cs}$

Una vez descrito el modo de evaluar la idoneidad para el surf de cada una de las variables descritas, es necesario integrar la información desagregada en un índice que informe acerca de la calidad de las condiciones de oleaje y viento definidas en función de los subíndices  $I_{Hs}$ ,  $I_{Tp}$ ,  $I_w$  e  $I_{SQI}$ . Las fórmulas (5.2) y (5.3) indican como se ha calculado el índice propuesto, entre paréntesis se indica el rango de valores que cada subíndice puede obtener:

$$\text{Escala Global} \quad I_{cs(0-10)} = \frac{I_{Hs(0-10)} + I_{Tp(0-10)}}{2} \times I_{w(0-1)} \quad (5.2)$$

$$\text{Escala Regional} \quad I_{cs(0-10)} = \frac{I_{Hs(0-10)} + I_{Tp(0-10)}}{2} \times I_{w(0-1)} \times I_{SQI(0.75-1)} \quad (5.3)$$

El  $I_{cs}$  evalúa el estado de mar en una escala de 1 a 10. A escala global, valores por debajo de 5 indican probabilidad nula de generar olas surfeables (mala calidad del estado de

mar), de 5 a 7 una probabilidad media (calidad media) y mayores a 7 una probabilidad alta (calidad alta).

A escala regional, la interpretación es ligeramente diferente. En esta escala, el  $I_{cs}$  adquiere un significado más determinista, en lugar de probabilístico. En la escala regional, los principales parámetros relativos al oleaje y al viento, son resueltos a una escasa distancia de la rompiente. Esto implica que si  $I_{cs}$  es mayor a 5, la rompiente representada, presentará unas olas surfables de calidad intermedia. Si  $I_{cs}$  es mayor a 7 la calidad de las condiciones de surf será alta.

## 5.4. Comfort index, $I_c$

El subíndice  $I_c$  ha sido diseñado para integrar aquellos aspectos climáticos no relativos al oleaje que condicionan en mayor medida la experiencia del surf. Como en otras actividades deportivas y de ocio que se realizan en el medio natural, el surf se ve sujeto a las inclemencias del tiempo. Del conjunto de variables meteorológicas que un surfista considera a la hora de elegir un destino de surf, destaca la temperatura (sensación térmica) como la más influyente, más incluso que la pluviometría o la humedad relativa u otro tipo de variables biometeorológicas que también podrían ser incorporadas. A pesar de ser este un aspecto claramente a considerar, el surf es practicado en todas latitudes gracias a la mejora del equipamiento térmico en forma de trajes de neopreno, escaupines, guantes y gorros. Hoy día es frecuente encontrar surfistas en Canadá, Islandia o Noruega, siempre que las condiciones de oleaje lo permitan. Por lo tanto, la sensación térmica esperada no debe tener un efecto absoluto dentro de la metodología general, ya que en ningún caso elimina la posibilidad de surfear si se cuenta con el equipamiento necesario. Por este motivo, y dado que cuando se analizan aéreas relativamente pequeñas, las diferencias térmicas no son muy acusadas, el  $I_c$ , es solo aplicado en el análisis global de las condiciones de surf.

La mejora en la calidad y efectividad de los materiales aislantes junto a la, cada día mayor saturación de las rompientes más conocidas, hace que actualmente exista una tendencia a viajar a lugares donde tradicionalmente el surf era impracticable. Esta tendencia hace que las marcas de surf más potentes promocionen eventos y

campeonatos en lugares de agua fría como Thurso en el norte de Escocia o Tasmania en el sur de Australia. Estos lugares están caracterizados por presentar un clima marítimo favorable, pero sus condiciones atmosféricas no resultan cómodas para la práctica del surf. La figura 5.15 corresponde a un test realizado por una famosa marca de material deportivo en aguas de Islandia: evidentemente las bajas temperaturas condicionan la experiencia del surf, haciéndola poco apetecible.



Figura 5.15. Test de nueva gama de trajes de 6mm, Islandia. Fuente: [www.surferstoday.com](http://www.surferstoday.com).

En este apartado se parametriza el efecto de la temperatura, y se analiza la variabilidad mensual de  $I_{cs}$ , que se desprende de considerar el  $I_c$  dentro de la evaluación global de las condiciones de surf.

#### 5.4.1. Variables involucradas

El cálculo de  $I_c$ , se basa en las series mensuales de temperatura de la superficie del mar,  $SST$ , y del aire,  $ST$ . La resolución temporal (mensual) a la cual se dispone de la información meteorológica necesaria para estimar el índice, condiciona la evaluación aplicable a de las variables involucradas. Al disponer de valores medios mensuales resulta imposible conocer la varianza de los parámetros citados a una escala temporal menor, varianza ésta que en el caso de  $SST$  puede ser mínima pero no en el caso de  $ST$ .

La sensación térmica que experimenta el surfista depende fuertemente de SST y ST aunque el viento y la humedad relativa son también muy influyentes. Por tanto, el  $I_c$  se calcula en función de la media aritmética entre ambas variables, cuyo valor ofrece una estima sobre la sensación térmica mensual esperable. El factor temperatura puede ejercer tres efectos en las condiciones de surf: limitante, condicionante o nulo, en función de los rangos en la que ésta oscile.

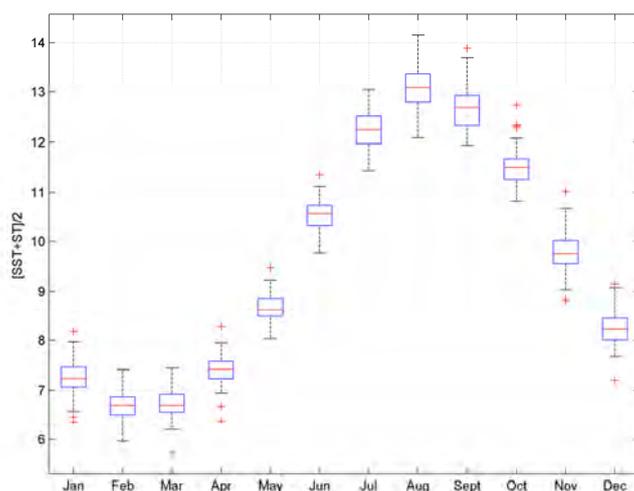


Figura 5.16. Variabilidad anual de  $[SST+ST]/2$  en Thurso, Escocia.

Así, para una rompiente localizada en Escocia se tiene que la variabilidad de  $[SST+ST]/2$  es la que se muestra mediante un gráfico de cajas en la figura 5.16. En la figura se representa la mediana de la función de distribución empírica de  $[SST+ST]/2$  mensual mediante una línea roja, los rectángulos azules representan el valor superior e inferior de los percentiles del 25% y 75%, los corchetes negros se extienden a los valores más extremos no considerados excepcionales, estos últimos son representados por cruces rojas.

En Escocia, como en todo el Atlántico Norte, las mejores condiciones de oleaje se producen durante los meses de invierno, sin embargo, las guías especializadas (ej. *The Stormrider Guide*), no recomiendan la visita durante los meses de Noviembre a Mayo, cuando la temperatura media mensual cae por debajo de los 10 grados centígrados. Por este motivo, el recurso surf en esta zona, está claramente limitado por la temperatura durante la mayoría de los meses del año. Este hecho modifica la forma de la distribución mensual del recurso que se detallará posteriormente en la figura 5.19.

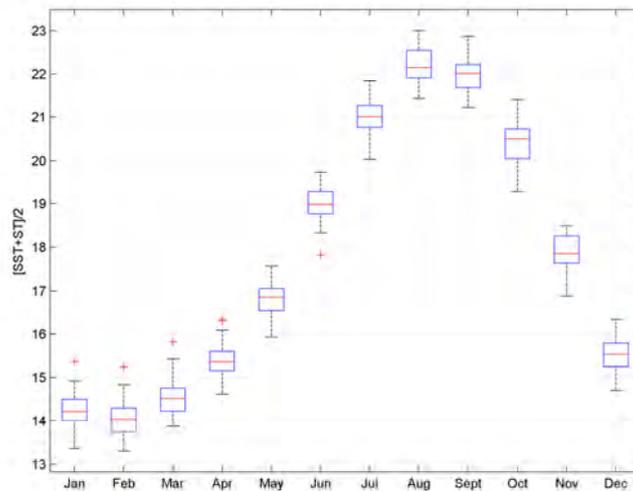


Figura 5.17. Variabilidad anual de  $[SST+ST]/2$  en Sagres, Portugal.

En la figura 5.17 se muestra la distribución mensual de  $[SST+ST]/2$  en Sagres, una popular zona de surf al sur Portugal. Nótese como en ningún caso la temperatura media mensual baja de los 13 grados. En este caso, las guías especializadas aconsejan este destino entre los meses de Octubre a Diciembre preferentemente, y de Enero a Abril en menor medida, evitando los meses de Mayo a Julio. Esto es debido a que durante los meses posteriores al verano, coinciden temperaturas agradables con los primeros *swells* del invierno en el Atlántico Norte. Desde primeros de año hasta Abril, la temperatura media mensual registra sus valores más bajos, en torno a los 14 grados. Motivo por el cual las guías catalogan a este periodo como medianamente aconsejable, a pesar de que en esta época ocurren frecuentemente buenas condiciones de oleaje. Por tanto, en esta localidad, la temperatura pasa de ser un factor limitante a un factor condicionante, ya que la forma de la distribución mensual del recurso no resulta modificada.

Por último, en la figura 5.18, se muestra la distribución mensual de temperaturas para Golfo Dulce, Costa Rica. En esta zona de surf, debido a su latitud y clima tropical, la temperatura media mensual,  $[SST+ST]/2$  oscila entre los 25 y 28.5 grados. Las guías de surf recomiendan este destino especialmente entre los meses de Marzo a Julio y en menor medida hasta Octubre, ya que el resto de meses el oleaje es el factor más limitante. En este caso, la temperatura deja si quiera de ser condicionante en cuanto al efecto que la variabilidad estacional ejerce sobre el recurso surf.

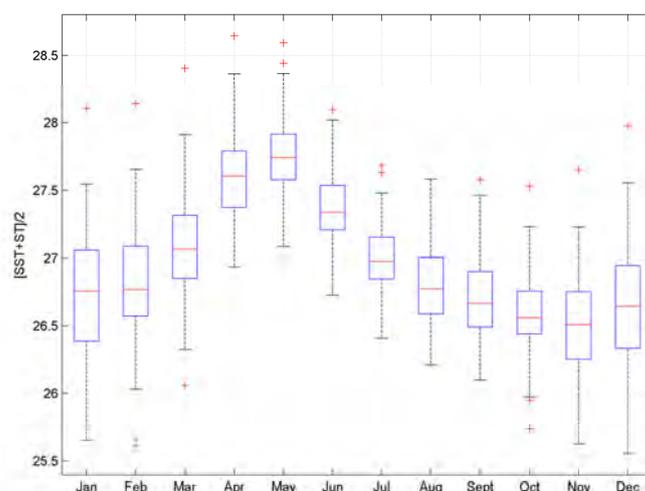


Figura 5.18. Variabilidad anual de  $[SST+ST]/2$  en Golfo Dulce, Costa Rica.

Una vez planteadas las tres categorías de afección de la temperatura a las condiciones de surf, se procede a exponer la escala propuesta para evaluar el efecto de la variable  $[SST+ST]/2$ .

### 5.4.2. Criterios para el cálculo de $I_c$

Con el objetivo de parametrizar las tres categorías de afección citadas en el apartado 5.4.1. , se propone la siguiente escala, tabla 5.5.

Descripción	$[SST+ST]/2$ ( $^{\circ}C$ )	$I_c$ rating
Extremadamente frío, incluso con traje (6 mm), esarpines, guantes y gorro	<4	0.5
Frío, incluso con traje (5 mm), esarpines, guantes y gorro	4-8	0.75
Moderadamente confortable, es necesario traje (4 mm), esarpines, guantes y gorro	8-12	0.8
Moderadamente confortable, es necesario traje (4 mm)	12-16	0.85
Confortable, es necesario traje (3 mm)	16-20	0.9
Condiciones térmicas ideales, puede ser necesaria licra o traje corto	>20	1

Tabla 5.5. Escala de evaluación de  $[SST+ST]/2$ .

Para un estado de mar ideal,  $I_{cs}=10$ , la escala propuesta, penaliza este valor a la mitad si  $[SST+ST]/2 < 4^{\circ}C$ , a 7.5 si  $[SST+ST]/2 < 8^{\circ}C$  y deja de tener efecto sobre la calidad del recurso si  $[SST+ST]/2 > 20^{\circ}C$ , ya que a partir de dicho umbral no se pueden establecer diferencias preferenciales en cuanto al confort del deportista se refiere.

Para ilustrar el efecto que la temperatura ejerce en la distribución estacional del recurso surf, se muestra en la figura 5.19, la modulación causada por esta variable en el valor medio mensual de  $I_{cs}$ , los paneles corresponden, en sentido horario, a Thurso, Sagres, Margaret River en Australia y Golfo Dulce. Las barras de color gris claro indican el valor medio mensual de  $I_{cs}$ , en gris oscuro se representan los valores medios mensuales resultantes de multiplicar  $I_{cs} \times I_c$  y la línea negra muestra la evolución mensual de  $[SST+ST]/2$ .

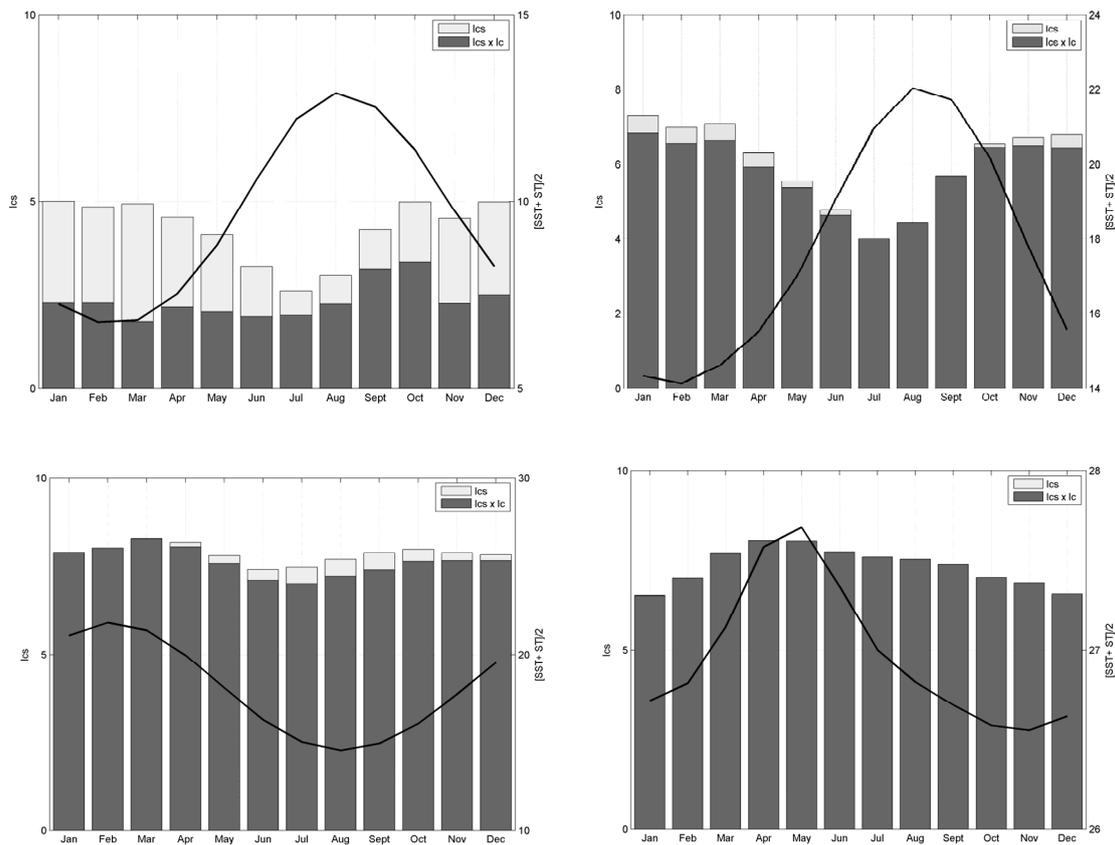


Figura 5.19. Modulación en  $I_{cs}$  medio mensual causada por la temperatura en zonas de Thurso (panel superior izquierdo), Sagres (panel superior derecho), Margaret River (panel inferior izquierdo) y Golfo Dulce (panel inferior derecho).

Nótese como la temperatura puede tener un efecto limitante en lugares de latitudes altas, haciendo que la forma de la distribución estacional de las condiciones de surf se vea modificada, como es el caso de Thurso. En estos lugares, la mejor época para el surf no se corresponde con la mayor ocurrencia de buenas condiciones de oleaje. En latitudes más templadas, pero con estacionalidad térmica moderada, como es el caso de Sagres o Margaret River, la distribución estacional de las condiciones de surf mantiene la misma forma que la distribución de las condiciones de oleaje. En estos lugares, la temperatura condiciona la experiencia del surf, pero rara vez la limita. Por último, como es el caso de Costa Dulce, el clima tropical característico de estas latitudes, hace que la temperatura no sea un factor a considerar, por lo que en estos casos el  $I_c$  no tiene ningún efecto sobre el  $I_{cs}$ .

Conviene aclarar, que una disminución en la calificación media mensual de  $I_{cs}$ , conlleva una disminución en la probabilidad de ocurrencia de buenas condiciones de surf. En la realidad, ocurre que la temperatura modifica la percepción del surfista ante idénticas condiciones de oleaje. Por este motivo, durante los meses más fríos del año, un surfista necesitará de mejores condiciones de oleaje para entrar en el agua que durante los meses más cálidos del año, cuando las altas temperaturas hacen más apetecible la sesión de surf.

En la figura 5.20, se puede observar el efecto limitante de la temperatura sobre el tiempo de excelencia o probabilidad de ocurrencia de  $P[I_{cs} \geq 7]$  en Thurso, pasando de persistencias de más del 50% al 20% durante los meses invernales. En Sagres y Margaret River, se puede observar el efecto condicionante de la temperatura, disminuyendo alrededor del 10% la persistencia de buenas condiciones de surf durante los meses más fríos. En la gráfica correspondiente a Golfo Dulce, puede observarse como en ningún mes del año la temperatura afecta a la disponibilidad de condiciones de surf, por lo que, en este caso, el efecto de esta variable sobre el recurso es nulo.

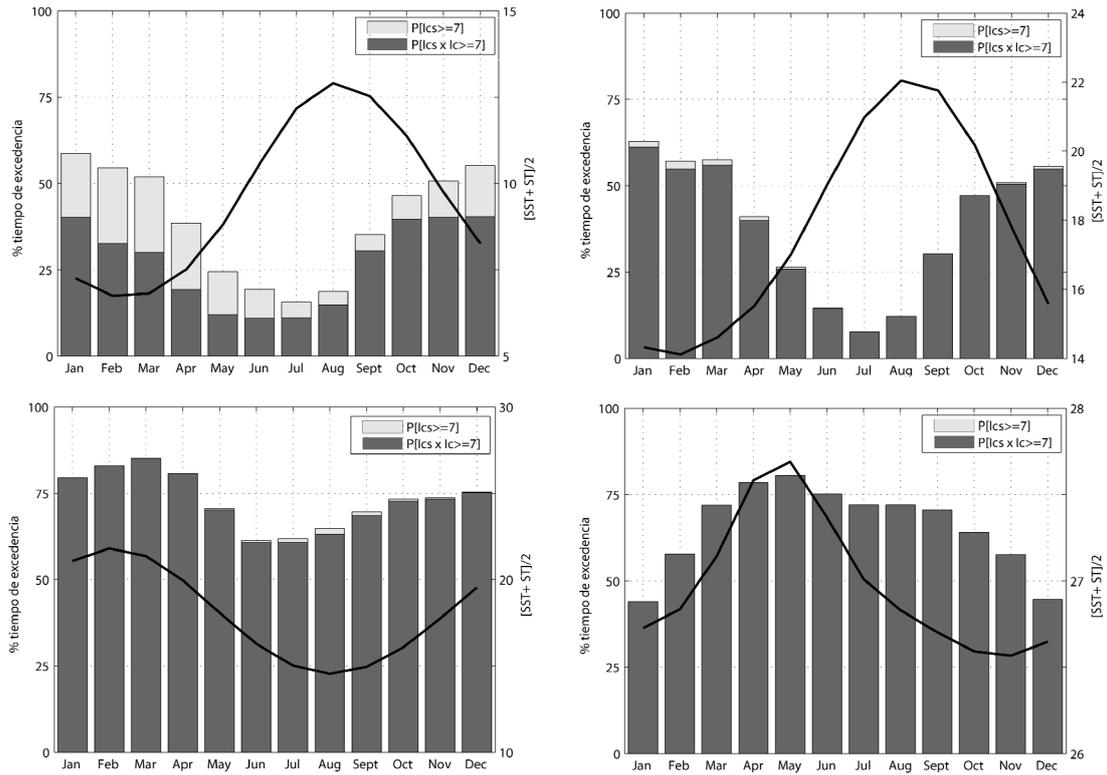


Figura 5.20. Modulación del tiempo de superación medio mensual de  $P[I_{cs} \geq 7]$  causada por la temperatura en las zonas de Thurso (panel superior izquierdo), Sagres (panel superior derecho), Margaret River (panel inferior izquierdo) y Golfo Dulce (panel inferior derecho).

## 5.5. Effective index, $I_e$

En el apartado 5.2 se establecieron los fenómenos físicos más influyentes en el modelado del recurso surf. Entre ellos, la marea astronómica ( $I_{Tide}$ ) y las variaciones de las horas diarias de luz ( $I_{Day}$ ), se presentan como factores invariantes en el largo plazo que determinan la variabilidad espacial y temporal de las condiciones de surf.

En este apartado se describe la metodología desarrollada para integrar ambos aspectos dentro del  $I_e$ . Este subíndice puede ser empleado para, en última instancia, obtener una estima más certera sobre el tiempo real durante el cual se producen unas u otras condiciones de surf alrededor del globo o en una rompiente dada.

El índice efectivo puede obtener valores de 0 ó 1, desechando así, aquellos estados de mar acontecidos en horas de oscuridad o con velocidades de variación de la marea no

apropiados. El  $I_c$  se calcula como el producto directo entre  $I_{Day}$  e  $I_{Tide}$ . En la escala regional, al no existir variaciones significativas en las variables integradas en el  $I_c$ , la aplicación de este índice no aporta diferencias espaciales en la estima real.

## 5.5.1. Variables involucradas

### 5.5.1.1. Duración del día, $I_{Day}$

El efecto que tiene el incorporar la duración del día en un análisis global de disponibilidad de condiciones surfeables, es claro. Dependiendo de la latitud, las variaciones estacionales en esta variable pueden ser superiores a las 8 horas. Así, si las mejores condiciones de clima marítimo ocurren durante los días más cortos del año, la distribución efectiva en la ocurrencia de eventos surfeables puede verse modificada.

En la rompiente, el viento varía en periodos temporales menores a los que lo hace el oleaje. Las brisas térmicas, por ejemplo, pueden cambiar la calidad de un estado de mar de 10 a 0 en cuestión de minutos. Los vientos térmicos muestran un patrón de variabilidad direccional diurno. Es decir, en días despejados, bajo situaciones de tiempo estable, el viento suele tomar dirección *offshore* durante la noche, cuando la superficie del mar es más cálida que la superficie del terreno colindante. Una vez amanece, cuando la capa superficial del suelo se ha calentado lo suficiente, esta comienza a emitir radiación infrarroja que calienta las capas de aire más bajas. Como resultado de este aumento de temperatura, la densidad del aire sobre tierra firme es menor que la del aire que se encuentra sobre el mar, generándose un viento convectivo dirección mar a tierra. Éste, por el efecto Coriolis, suele tomar dirección *side-shore*, perjudicando la calidad del surf en las rompientes más expuestas a estos vientos. Así, a lo largo de un día, en costas continentales (en las insulares no es tan marcado), es típico que el viento sea de direcciones favorables durante la noche y a primera y última hora del día. Mientras que durante las horas centrales, suele presentar direcciones menos favorables.

Se conoce como día, de manera genérica, al lapso de tiempo que va desde la salida del Sol a su ocaso. La refracción en la atmósfera terrestre motiva que se vea luz aun cuando el Sol no ha salido todavía, este hecho alarga el tiempo de luminosidad.

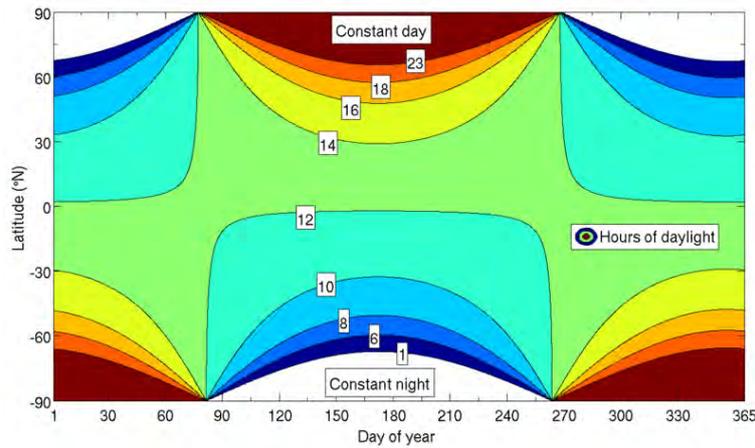


Figura 5.21. Duración del día en la Tierra. Fuente Wikipedia.

La duración del día y la noche va cambiando en el transcurso del año, siendo de 12 horas (en todas las latitudes) en los equinoccios, de más de 12 en primavera y verano (alcanzando el día más largo en el solsticio de verano, donde también ocurre la noche más corta), y de menos de 12 horas en otoño e invierno (alcanzándose en el solsticio de invierno el día más corto y la noche más larga).

Este efecto se acentúa más cuanto mayor es la latitud. En alguna época del año hay día o noche permanente en las regiones polares, tanto del Hemisferio Norte como del Hemisferio Sur, caracterizadas por estar a una latitud que, en valor absoluto, es mayor que  $\phi \approx 66.5^\circ$ .

Para calcular el instante en el que amanece (orto) y anochece (ocaso) se emplea la ecuación (5.4) que depende de la latitud y la declinación solar, conocida como ecuación del tiempo:

$$\cos \omega_0 = -\tan(\phi) \cdot \tan(\delta) \tag{5.4}$$

donde  $\omega_0$  es el ángulo horario en grados (valores negativos corresponden al amanecer y positivos a la puesta de sol),  $\phi$  es la latitud y  $\delta$  la declinación solar.

La tierra gira alrededor de su eje a una velocidad angular de  $15^\circ / hora$  ó  $360^\circ / día$ , así  $\omega_0 / 15^\circ$  da la hora del amanecer como el número de horas antes de llegar al mediodía local, o la hora del ocaso como el número de horas desde el mediodía, entendiendo por

mediodía el instante en el que los rayos del sol inciden ortogonalmente sobre la superficie. Por convención, se asume que  $\phi$  es 0 en el ecuador, positivo hacia el norte y negativo hacia el sur. Del mismo modo el valor de la declinación solar  $\delta = 0$  en el equinoccio de primavera y otoño, cuando el Sol está situado exactamente sobre el ecuador,  $\delta$  es positivo durante el verano boreal y negativo durante el verano austral.

Debido a la refracción de los rayos solares causada por la atmósfera, el observador percibe la posición del Sol desplazada. En el momento en el que este aparece por el horizonte, se encuentra desplazado alrededor de  $-0.83^\circ$ . A éste desplazamiento se le conoce como elevación,  $\psi$  e indica la diferencia en grados de la posición real y aparente del Sol. Debido a la difusión es posible percibir luz antes y después de la salida y ocaso aparente, a este periodo de tiempo durante el cual la luz está presente se conoce como crepúsculo. Este efecto incrementa el valor de la elevación relativa,  $\psi$  a valores de  $-6^\circ$ .

Así, para considerar el efecto de la elevación en la ecuación del tiempo, la ecuación (5.5) ha de ser modificada para considerar este fenómeno:

$$\cos \omega_0 = \frac{\sin(\psi) - \sin(\phi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cdot \cos(\delta)} \quad (5.5)$$

donde  $\psi$  es la altitud del centro del disco solar .

Esta ecuación general depende de un conjunto de variables que han de ser calculadas previamente, variables que dependen a su vez de las constantes terrestres y solares. Por lo tanto para calcular el orto y el ocaso de un día y una posición dada hay que calcular previamente las variables que se exponen a continuación:

- Ciclo juliano, calculado según:

$$n = \text{round} \left( J^* - 2451545 - 0.0009 - \frac{\lambda}{360} \right) \quad (5.6)$$

donde  $J^*$  es el día juliano,  $\lambda$  la longitud y  $n$  es el ciclo juliano desde el 1 de Enero del 2000.

- Mediodía solar:

$$J = 2451545 + 0.0009 + \frac{\lambda}{360} + n \quad (5.7)$$

donde  $J$  es una aproximación al instante en el que se produce el mediodía para una longitud dada.

- Anomalía solar media designada por la letra  $M$ . Se llama así a uno de los valores de los elementos orbitales de un objeto. Este número (ángulo entre 0 y 360 grados) indica donde está el objeto en su órbita en una fecha dada. Un ángulo pequeño hace que el objeto esté justamente en su perihelio, o punto más cercano al Sol. Un ángulo de 180 grados indica que el objeto esta en su afelio, o punto más alejado del Sol. En un ángulo cercano a los 360 grados el objeto se esta aproximando al perihelio.  $M$  se calcula:

$$M = 357.5291 + 0.98560028 \times (J^* - 2451545) \quad (5.8)$$

- Ecuación del centro, que calcula la diferencia de una posición angular dada en una órbita elíptica y otra circular. Esta variable,  $C$  viene dada por:

$$C = 1.9148 \times \sin(M) + 0.02 \times \sin(2M) + 0.0003 \times \sin(3M) \quad (5.9)$$

- Longitud eclíptica, la eclíptica es la ruta que el Sol parece seguir por el cielo durante el transcurso de un año. Es también la proyección del plano orbital de la tierra sobre la esfera celeste. Al ángulo longitudinal se le conoce como la longitud eclíptica,  $\lambda^*$ :

$$\lambda^* = (M + 102.9372 + C + 180) \quad (5.10)$$

- Tránsito solar,  $J_s$ , calculado como la hora angular del medio día solar según:

$$J_t = J^* + (0.0053 \times \sin(M)) - (0.0069 \times \sin(2\lambda^*)) \quad (5.11)$$

- Declinación solar,  $\delta$  calculada según:

$$\delta = \sin^{-1}(\sin(\lambda^*) \times \sin(23.45)) \quad (5.12)$$

Por lo tanto, si se considera un ángulo de elevación  $\psi = -0.83^\circ$  para considerar el efecto de la refracción de los rayos solares producida por la atmósfera, se tiene que el ángulo horario queda definido por:

$$\omega_0 = \cos^{-1}\left(\frac{\sin(-0.83) - \sin(\phi) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\phi) \cdot \cos(\delta)}\right) \quad (5.13)$$

Así, la hora del amanecer quedará definida por:

$$J_{rise} = J_t - (J_{set} - J_t) \quad (5.14)$$

donde  $J_{set}$  es la hora del ocaso, y viene definida por:

$$J_{set} = 2451545 + 0.0009 + \left(\frac{\omega_0 + \lambda}{360} + n + 0.0053 \sin(M)\right) - 0.0069 \sin(2\lambda^*) \quad (5.15)$$

Así, cada dato de calidad horaria es multiplicado por 0 si ocurre durante la noche o por 1 si ocurre durante el día, captando de esta forma la variabilidad diurna en la dirección del viento. En la figura 5.22 se muestra la misma información que en la figura 5.11, en este caso modificada por el subíndice  $I_{Day}$ . Como se puede apreciar, la aplicación horaria de este subíndice es capaz de discriminar o desechar aquellos picos en la calidad del surf acontecidos durante la noche, como es el caso del pico de la madrugada del día 25 de Septiembre originado por un cambio en la dirección del viento de NW a SW.

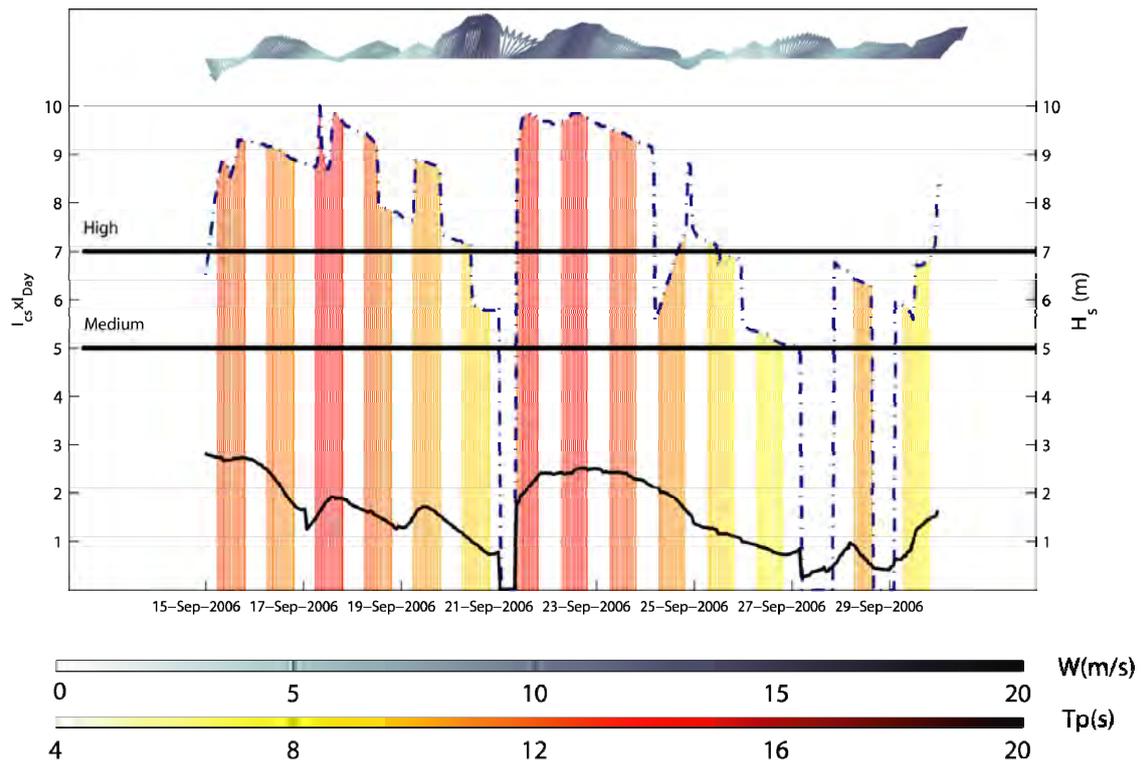


Figura 5.22. Efecto de la duración del día en la disponibilidad de condiciones de surf.

En la figura 5.23 se combina la probabilidad de ocurrencia,  $P[I_{cs} \geq 7]$  con la evolución en la duración de las horas de luz en distintas localizaciones. En Thurso (panel superior izquierdo), cuya latitud ronda los 59 grados norte, las variaciones en las horas diarias de luz entre invierno y verano es de aproximadamente 6-18 horas, este hecho modifica profundamente la distribución real de las condiciones de surf, haciendo que la probabilidad de ocurrencia máxima se alcance durante los meses de Septiembre y Octubre, mientras que los oleajes más energéticos son más frecuentes durante los meses de invierno. En Sagres (panel superior derecho), cuya latitud ronda los 37 grados norte, las variaciones en las horas diarias de luz no superan las 4 horas entre invierno y verano, por lo que su efecto en la distribución mensual de  $P[I_{cs} \geq 7]$  es menor que en el caso anterior, manteniendo la forma aproximada del histograma. En San Clemente, California (panel inferior izquierdo), cuya latitud ronda los 32 grados norte, el incorporar la duración del día hace que se pase de un histograma típicamente estacional (mayor frecuencia de buenas condiciones en invierno que en verano) a un histograma donde las probabilidades de buen surf prácticamente se igualan en todos los meses del año. En Margaret River (panel inferior derecho), cuya latitud ronda los 33 grados sur, la

forma del histograma coincide con la forma que toma la línea de duración del día, de manera que en este caso no cambia la distribución relativa de  $P[I_{cs} \geq 7]$ .

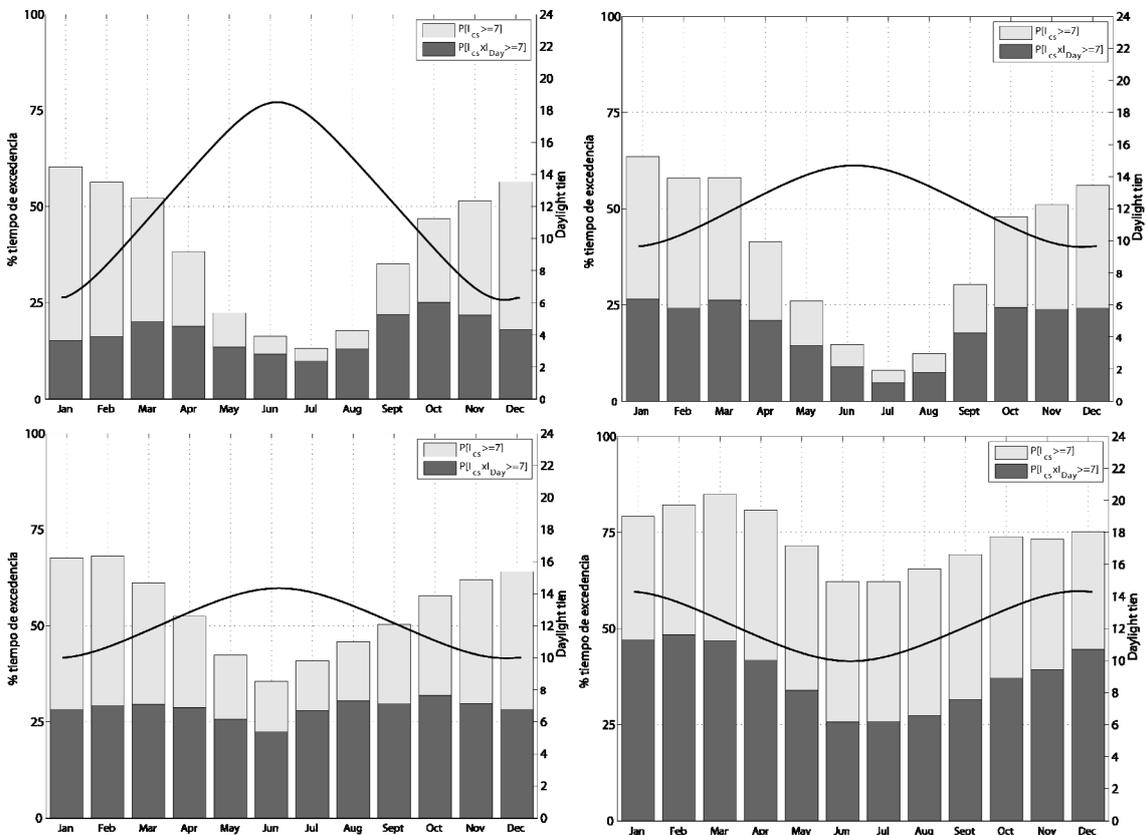


Figura 5.23. Modulación del tiempo de superación medio mensual de  $P[I_{cs} \geq 7]$  causada por la variación en las horas de luz en las localizaciones de Thurso (panel superior izquierdo), Sagres (panel superior derecho), San Clemente (panel inferior izquierdo) y Margaret River (panel inferior derecho).

### 5.5.1.2. Marea astronómica, $I_{Tide}$

En la práctica, la mayoría de las rompientes presentan un momento óptimo dentro del ciclo de marea. Si se analiza la información existente referente a este aspecto para una región, por ejemplo, el Reino Unido, se tiene que solo el 23% de los spots funcionan durante todo el ciclo de marea, un 19% funciona en marea baja, un 13% en media marea a alta, un 35% prefiere niveles bajos, de baja a media marea, un 4% sólo funcionan a media marea, y un 6% funcionan sólo con mareas altas. Esta información puede ser visualizada en la figura 5.24.

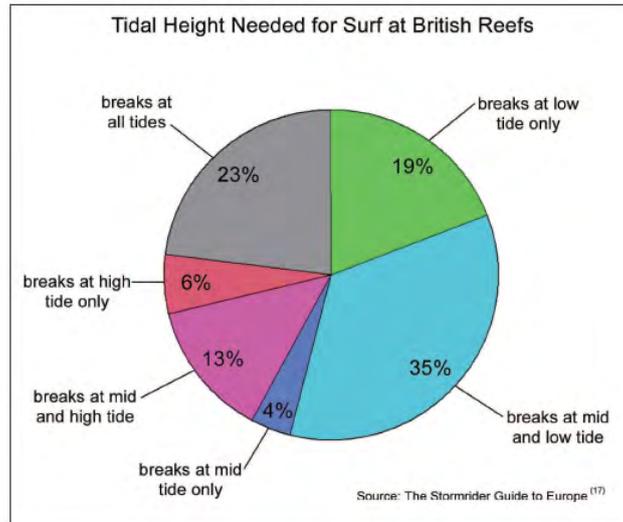


Figura 5.24. Niveles de marea óptimos para las rompientes del Reino Unido. Fuente: *Climate Change- A surfer perspective*.

Para ilustrar el efecto que la marea ejerce en el tiempo en el que es posible la práctica del surf a escala de rompiente, se presenta el ejemplo de la figura 5.25. En él se muestra la variación del nivel que se da durante un día de mareas vivas (línea azul) y muertas (línea negra). En rojo se ha señalado la porción de la curva que, en uno y otro caso, producirían olas surfeables. Nótese como en este caso, en el que el óptimo se produce a niveles intermedios de la marea, la ventana de tiempo surfeable es mayor (casi el doble) durante las mareas muertas que durante las vivas.

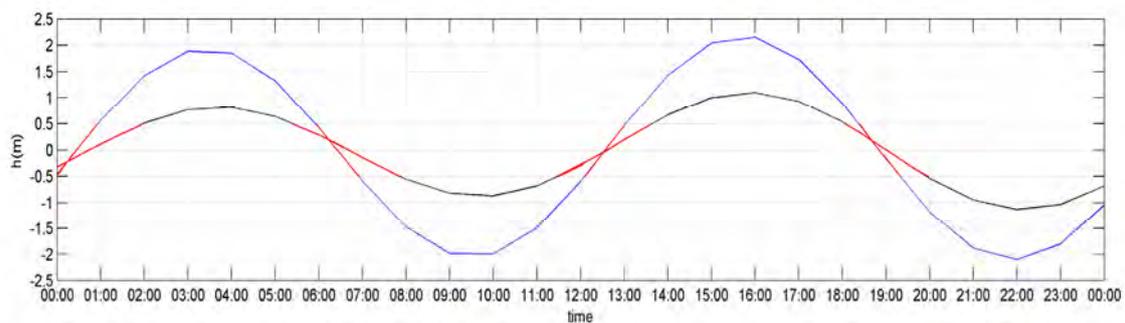


Figura 5.25. Variación del nivel del mar durante un ciclo de marea viva (línea azul) y muerta (línea negra), en rojo se señala la porción o ventana mareal surfeable.

Como resulta difícil conocer el óptimo de marea que presenta cada rompiente del planeta, para evaluar el efecto de este factor, se plantea un criterio general basado en la velocidad horaria de variación del nivel del mar,  $\partial\eta/\partial t$ . De esta forma, instantes donde la variación del nivel excede 0.8 m/hora comienzan a ser penalizados, considerando que este fenómeno limita la surfeabilidad. Por tanto, el  $I_{Tide}$  es un índice cuyo valor es 0 para

aquellos instantes donde  $\partial\eta/\partial t \geq 0.8$  m/hora y 1 para el resto de velocidades. Valores de  $\partial\eta/\partial t \geq 1$  m/hora ocurren entre la bajamar y la pleamar en ciclos vivos de mareas macromareales.

Una velocidad de variación del nivel del mar, superior al metro por hora, supone para un estado de mar surfeable medio, con  $1.5m \leq H_s \leq 3m$ , un cambio drástico en los fenómenos involucrados en la propagación y rotura del oleaje sobre la anomalía batimétrica local. Ésto produce un desplazamiento rápido del punto de rotura y, por lo tanto, unas condiciones de surf menos estables.

Otro aspecto que no ha sido considerado hasta el momento son las corrientes generadas por la onda de marea al interaccionar ésta con los contornos y la batimetría de la costa. El efecto de las corrientes alrededor de la rompiente puede alterar drásticamente las condiciones de surf ante un oleaje ideal. Puede darse el caso de que las corrientes generadas no permitan al surfista alcanzar el punto de rotura. Un valor medio de la velocidad de remada del surfista es 1 m/s (Henriquez, 2004). El efecto de la corriente no ha sido considerado para estimar las condiciones de surf; sin embargo, en la práctica existe relación entre la velocidad de la corriente y la carrera de marea. Por tanto al integrar la variable  $\partial\eta/\partial t$ , el efecto de las corrientes de marea está siendo implícitamente considerado.

Aplicando este criterio en diferentes localidades con distintas tipologías de marea, se puede observar el efecto promedio que tiene el considerar este factor en la ocurrencia de condiciones de surf, figura 5.26.

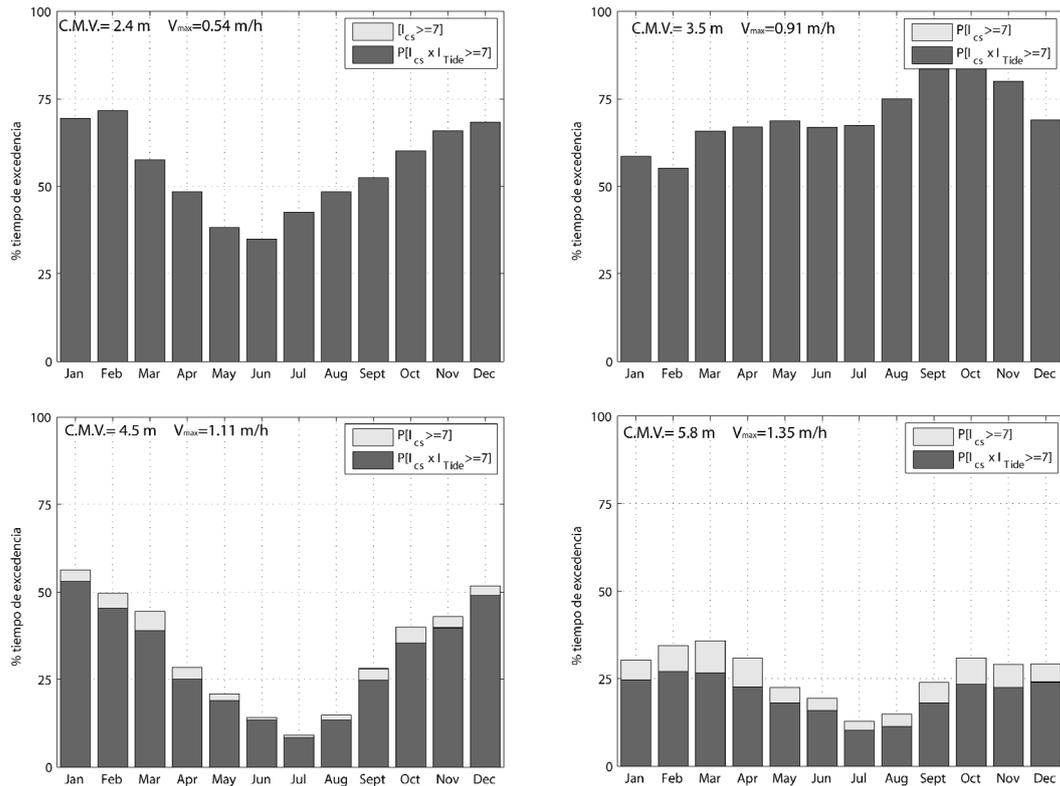


Figura 5.26. Modulación del tiempo de superación medio mensual de  $P[I_{cs} \geq 7]$  causada por la variación del nivel del mar en las localizaciones de San Clemente (panel superior izquierdo), Sumbawa (panel superior derecho), Mundaka (panel inferior izquierdo) y Brest (panel inferior derecho).

En aquellas costas cuya carrera de marea viva equinoccial no exceda los 3 m y por lo tanto no se superen valores de velocidad de variación de nivel mayores a los 0.8 m/h el efecto reductor de  $I_{Tide}$ , pues en la mayoría de los casos, las mareas micro y mesomareales, aun siendo capaces de cambiar la forma de rotura del oleaje, rara vez limitan la ocurrencia de buenas condiciones de surf (panel superior izquierdo, San Clemente y derecho Sumbawa, Indonesia). El subíndice  $I_{Tide}$  ejerce una clara influencia para carreras de marea viva equinoccial superiores a los 4 m. Este efecto es mayor en aquellos meses en los que ocurren las mayores mareas del año, Marzo y Septiembre (equinoccio de primavera y otoño). En estos casos la marea es capaz de reducir la persistencia de buenas condiciones de surf de un 5 a un 10% del tiempo (Mundaka, panel inferior izquierdo y Brest, panel inferior derecho).

## 5.6. Agregación de los subíndices descritos

Hasta el momento, se ha descrito la manera de evaluar los factores más relevantes para el surf a diferentes escalas espaciales. Dependiendo de la escala espacial y la finalidad del análisis, podrán ser considerados unos u otros de los subíndices propuestos. En la tabla 5.6 se muestra la agregación de los diferentes índices y subíndices para calcular la probabilidad de ocurrencia de condiciones de surf a las escalas global y regional.

Factores	Subíndices	Criterios globales	Criterios regionales
Oleaje	$I_{cs(1-10)}$	$I_{Hs(0-10)} I_{Tp(0-10)}$	$I_{Hs(0-10)} I_{Tp(0-10)} I_{SQI(0.75-1)}$
Viento		$I_{w(0-1)}$	$I_{w(0-1)}$
Temperatura	$I_{c(0.5-1)}$	$I_{c(0.5-1)}$	
Marea astronómica	$I_{e(0/1)}$	$I_{Tide(0/1)}$	
Duración del día		$I_{Day(0/1)}$	
		<i>Global Surf Index</i>	<i>Regional Surf Index</i>

Tabla 5.6. Esquema para la evaluación de las condiciones de surf a las tres escalas planteadas.

A escala global, el índice estandarizado horario que aglutina las variables más relevantes que rigen la distribución del recurso surf se ha denominado *Global Surf Index*. Éste es calculado según:

$$GSI = I_{cs} \cdot I_c \cdot I_e \quad (0 \leq GSI \leq 10) \quad (5.16)$$

Como se verá posteriormente, tanto  $I_{cs}$  como  $I_c$  muestran una variabilidad anual, interanual e incluso decadal elevada, mientras que  $I_e$  puede ser considerado constante a escalas mayores que la anual. Por lo tanto si lo que se pretende analizar es la variabilidad temporal a escalas mayores que la anual del recurso surf, bastara con calcular el GSI como el producto de los dos primeros subíndices,  $I_{cs}$  e  $I_c$ . Si por el contrario lo que se pretende es evaluar el recurso de la manera más rigurosa y realista posible, el índice efectivo ( $I_e$ ) ha de ser considerado, ya que éste ejerce una clara

influencia en la distribución espacio-temporal del recurso. En el análisis regional que se desarrolla en el capítulo 6, el índice utilizado es el *Regional Surf Index*, que en este caso es directamente igual al  $I_{cs}$  evaluado a pie de rompiente.

Debido a la complejidad en la estimación de la calidad de las condiciones de surf, se ha optado por analizar estadísticamente la probabilidad de superación de los umbrales establecidos en una unidad de tiempo determinada (mes, estación, año). Así, de aquí en adelante se utilizará la siguiente nomenclatura para diferenciar tres tipos de calidad del estado de mar:

- $P_{low} = P[GSI < 5]$ : Probabilidad de condiciones no surfeables o muy malas
- $P_{medium} = P[5 \leq GSI < 7]$ : Probabilidad de condiciones de surf de calidad media
- $P_{high} = P[GSI \geq 7]$ : Probabilidad de buenas condiciones de surf o de calidad alta

tal que  $P_{low} + P_{medium} + P_{high} = 1$ . A lo largo del documento se hará referencia a los niveles de calidad establecidos definidos en función de los diferentes subíndices descritos. Así,  $P_{high}[I_{cs}]$  se refiere a la probabilidad de buenas condiciones de surf (calidad alta) definidas en función de  $I_{cs}$ .

En la figura 5.27 se muestra un ejemplo de la serie temporal de calidad de las condiciones de surf en un punto del Cantábrico durante el año 2006, junto con los histogramas asociados. En el panel superior cada barra representa la calidad horaria de las condiciones de surf definidas en función de  $GSI$ , las barras de color verde corresponden estados de mar con calidad alta, las amarillas a calidades medias, y las rojas a estados de mar no surfeables. Al realizar el histograma (panel inferior izquierdo), encontramos la distribución empírica de las calidades de surf, la información agregada en función de los umbrales establecidos se muestra en el panel inferior derecho, donde es posible identificar la tasa o probabilidad de ocurrencia de cada uno de los tipos de calidad establecidos.

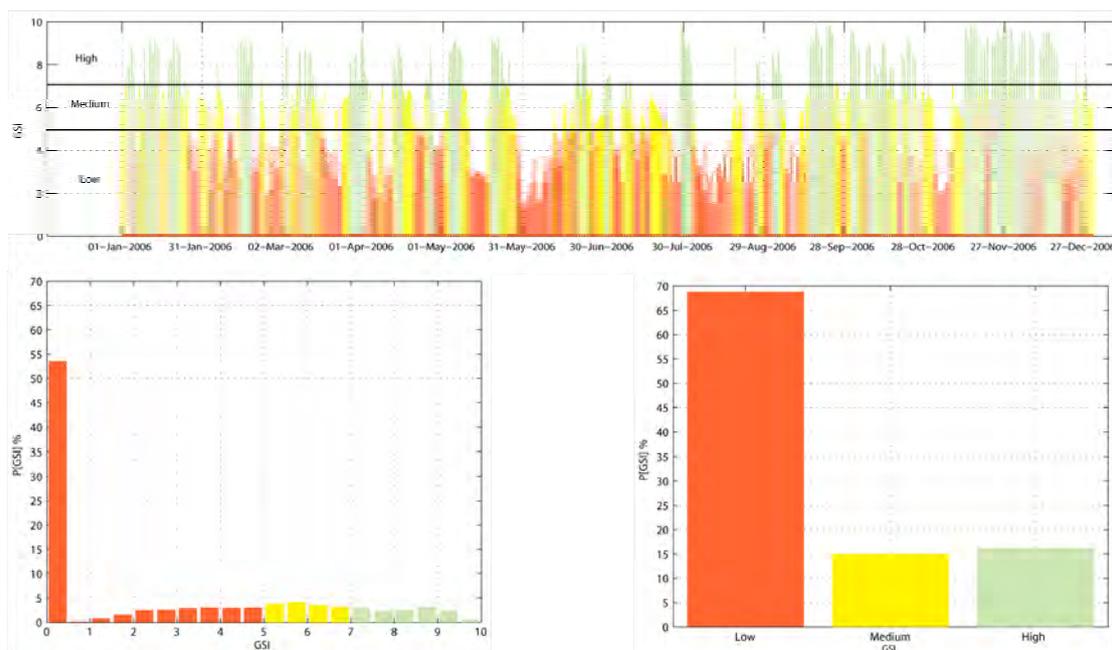


Figura 5.27. Serie temporal de calidad del surf en un punto del Cantábrico, año 2006 (panel superior). Histograma de calidades desagregadas (panel inferior izquierdo). Histograma de calidades agregado (panel inferior derecho).

## 5.6.1. Ejemplos de aplicación

El GSI, al tratarse de un índice estandarizado permite comparar de manera objetiva las condiciones de surf en distintos lugares del globo, y lo que es más importante, estimar la ocurrencia de las mismas de una forma realista.

### 5.6.1.1. Comparación objetiva de la ocurrencia de condiciones de surf, identificación de factores favorables y desfavorables

A modo de ejemplo, se han seleccionado 16 zonas de surf mundialmente conocidas repartidas por lo distintos océanos donde se ha aplicado la evaluación mediante los subíndices descritos.

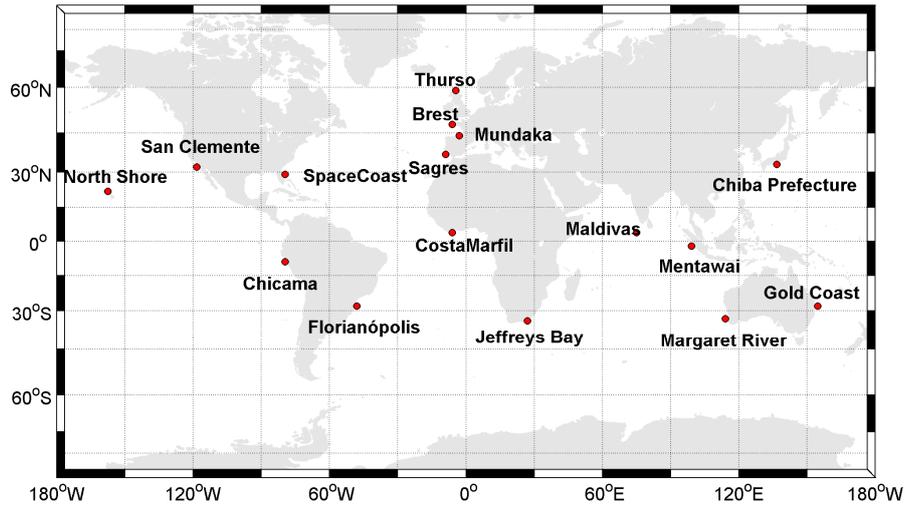


Figura 5.28. Localización de las zonas de surf analizadas.

La tasa de ocurrencia anual de las condiciones de surf de alta calidad,  $P_{high}$  en los lugares indicados se muestra en la figura 5.29. En esta gráfica se puede apreciar el efecto que cada subíndice ejerce en el valor final de la ocurrencia anual de  $P_{high}$ .

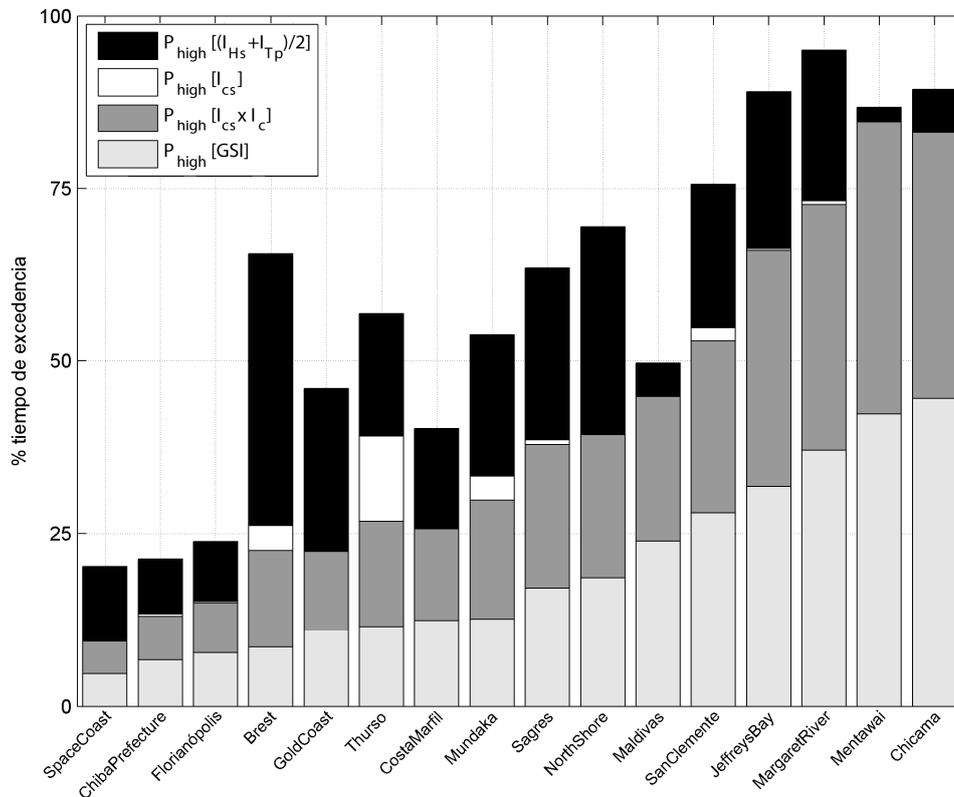


Figura 5.29. Comparativa de la tasa de ocurrencia media anual de las condiciones de surf.

La altura de las barras corresponde a la tasa de ocurrencia de  $P_{high} [I_{Hs} \cdot I_{Tp} / 2]$ ; el tramo más oscuro corresponde al efecto negativo que ejerce el subíndice  $I_w$ , el tramo de color

blanco corresponde al efecto negativo de la temperatura,  $I_c$ , el tramo de color gris intermedio corresponde al efecto negativo de los factores efectivos,  $I_e$ , por lo que el tramo gris más claro indica la tasa de ocurrencia de  $P_{high}[GSI]$ . Nótese que para una zona de surf dada, por ejemplo Thurso en Escocia, el color negro representa el tiempo simultaneo durante el cual se dan buenas condiciones de oleaje pero vientos desfavorables; el color blanco indica el tiempo durante el cual ocurren simultaneamente condiciones favorables de oleaje y viento junto con temperaturas no adecuadas para la práctica del surf (ausencia de color blanco indica que el  $I_c$  no ejerce ningún efecto). El color gris intermedio indica el efecto de  $I_e$  al considerar la duración del día y la marea astronómica. Por último, el color gris más claro indica el tiempo real durante el cual se da la ocurrencia conjunta de cada variable dentro de los rangos considerados adecuados, es decir,  $P_{high}[GSI]$ . En la figura 5.30 se muestra un ejemplo aclaratorio para la zona de surf de Mundaka, en ella se puede apreciar el tiempo estimado en el que ocurren condiciones favorables y desfavorables de los diferentes elementos considerados.

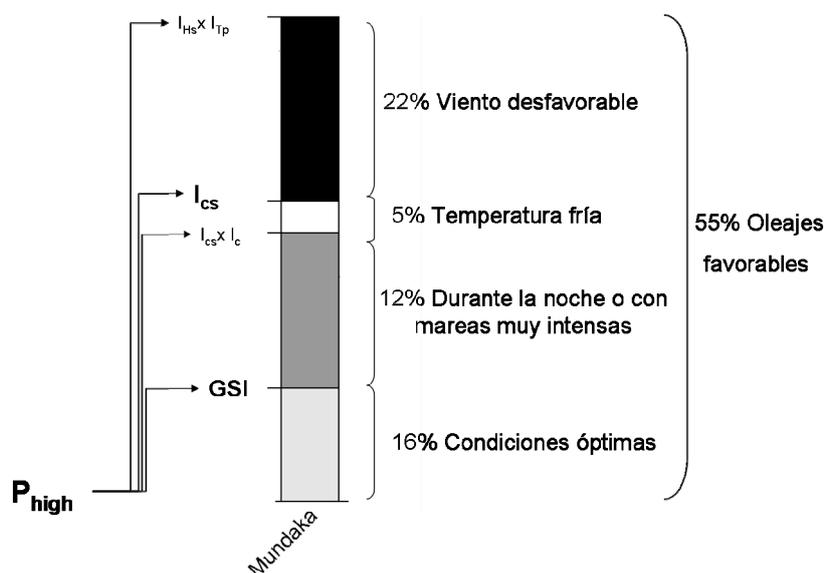


Figura 5.30. Condiciones favorables y desfavorables de los diferentes elementos considerados en la zona de surf de Mundaka.

De la figura 5.29 se pueden obtener las siguientes conclusiones generales:

- No son las zonas más energéticas las que mayor persistencia de condiciones de surf presentan. Éstas deben encontrarse a una distancia mínima de la zona de

generación o al abrigo de los vientos dominantes. Nótese como en el caso de Brest en la Bretaña francesa, se observan valores altos de ocurrencia de oleajes favorables; sin embargo el efecto negativo del viento es muy importante, rebajando la tasa de ocurrencia de buenas condiciones de un 65% a un 28% (abundancia de color negro).

- Son las zonas de surf correspondientes al Hemisferio Sur las que presentan mayor cantidad de buenas condiciones de surf, entre el 30% y 40% del tiempo real, lo que supone entre un 60% y un 80% de los días del año. La alta persistencia observada en estas zonas se corresponde con la mayor actividad de los vientos del oeste en la zona de convergencia extratropical del Hemisferio Sur. De las zonas analizadas destacan: Chicama en Perú, Mentawai en Indonesia y Margaret River en el oeste de Australia, todas están orientadas al oeste.
- Para aquellas zonas situadas en la margen oriental de las cuencas oceánicas, la tasa de ocurrencia puede ser directamente relacionada con el tamaño de la cuenca. Así en el Océano Atlántico se observan valores máximos del 18-20% (Sagres), en el Pacífico Norte del 25-30% (San Clemente) y mayor al 40% en el Índico y en el Pacífico Sur. Nótese como en estos dos últimos casos, el fetch disponible no se ciñe solo a la cuenca índica o pacífica respectivamente, ya que debido a la ausencia de masas continentales en el Hemisferio Sur los swells son capaces de propagarse grandes distancias.
- De las zonas analizadas, aquellas orientadas al este son las que menor ocurrencia de condiciones de surf presentan con valores inferiores al 10%. De ellas destaca la Gold Coast australiana, donde debido a la acción de los ciclones y tormentas tropicales la surfeabilidad se ve ligeramente incrementada.

EL GSI puede ser también empleado para analizar la estacionalidad de las condiciones de surf. En la figura 5.31 se muestra la distribución mensual de las condiciones de surf en cuatro de las zonas seleccionadas. Éstas se encuentran en la margen occidental de los océanos, presentando por tanto, tasas de ocurrencia bajas de buenas condiciones de surf.

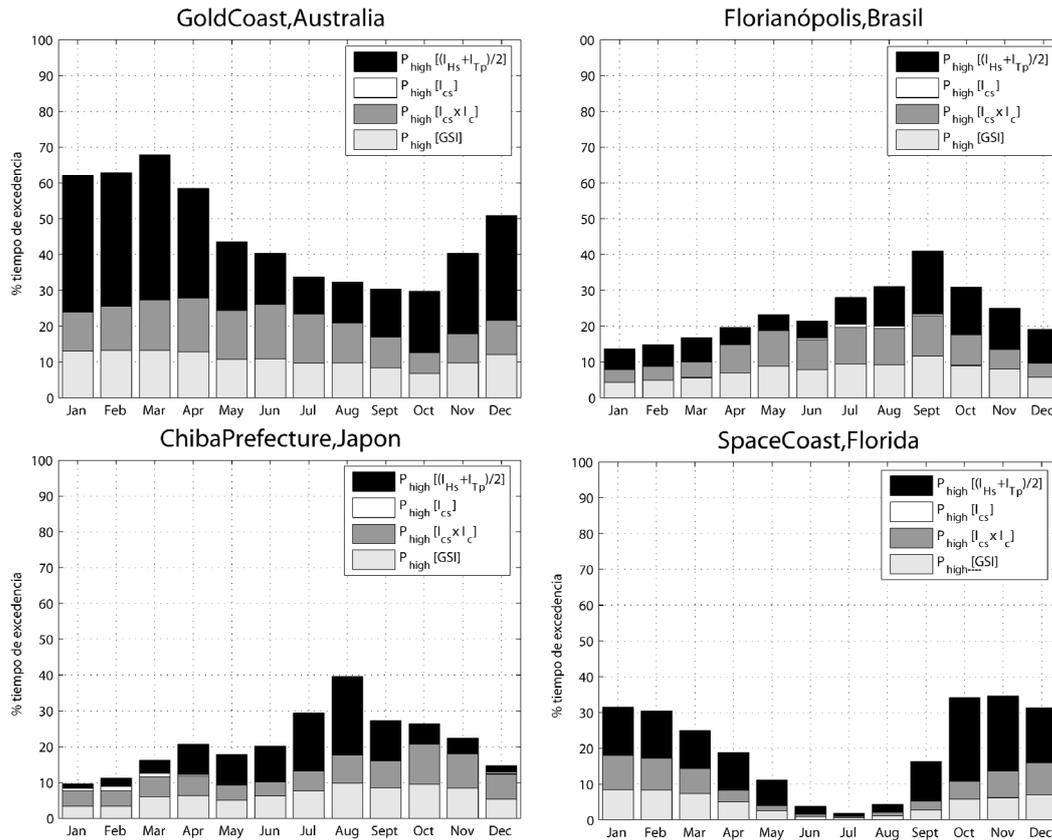


Figura 5.31. Distribución mensual de  $P_{high}$  en zonas de surf de la margen este de los continentes.

De las cuatro zonas que se muestran en la figura 5.31 destaca la Gold Coast, Queensland en Australia como una de las localidades con mejores condiciones de surf respecto al resto de tramos costeros con orientación este. La Gold Coast recibe gran cantidad de oleaje generado bien por las profundas borrascas del cinturón de vientos del oeste o por borrascas más pequeñas localizadas en el mar de Tasmania. Estas fuentes de generación son muy persistentes y especialmente activas durante los meses de primavera, tiempo durante el cual, también es probable la ocurrencia de ciclones tropicales sobre el Pacífico Occidental (justo después del verano austral). La tasa de ocurrencia media ronda el 10%, destacando el mes de Marzo como el más consistente. Florianópolis y Space Coast muestran una distribución mensual que se corresponde con el patrón típico estacional en las latitudes en la que éstas se encuentran. Sin embargo, la zona de Japón presenta un repunte en los meses de verano, durante los cuales es frecuente la ocurrencia de tifones.

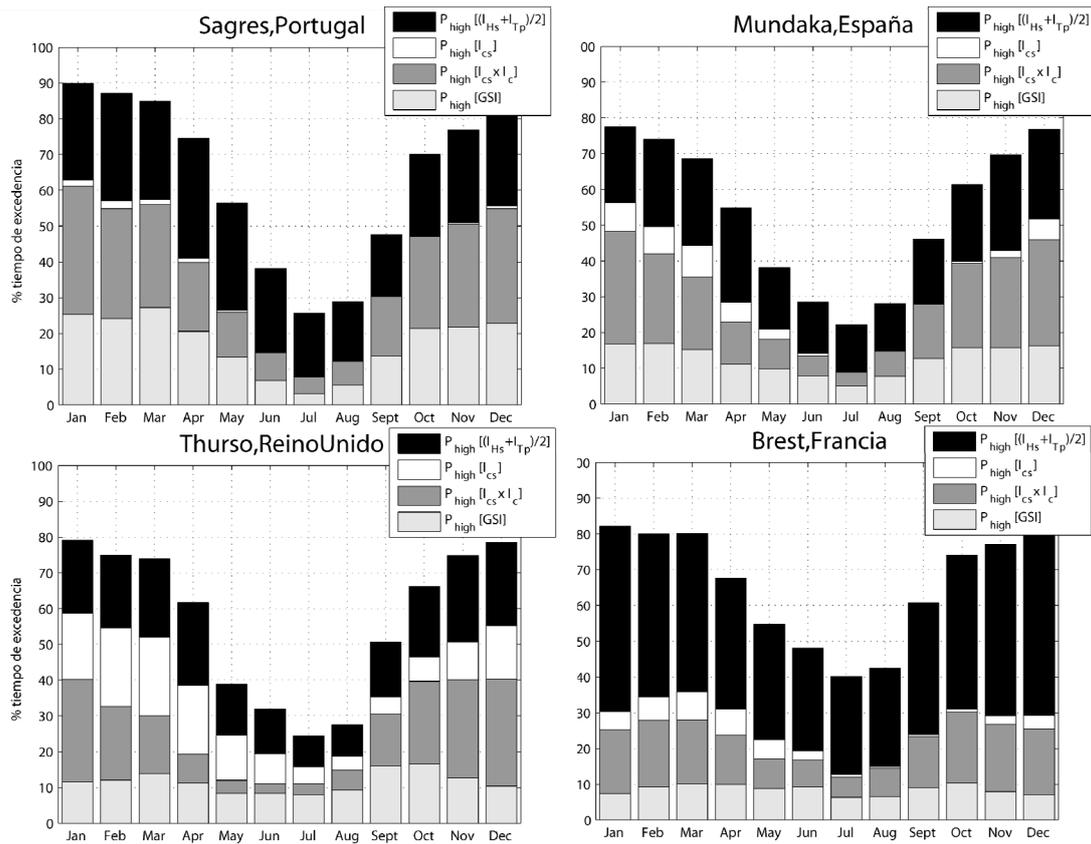


Figura 5.32. Distribución mensual  $P_{high}$  en zonas de surf de la margen oeste de los continentes.

En la figura 5.32 se muestra la distribución mensual de la probabilidad de condiciones de surf de las zonas noratlánticas seleccionadas. En el Atlántico Norte se aprecia una acusada estacionalidad que se manifiesta en las cuatro localizaciones seleccionadas. La tasa de ocurrencia de oleajes favorables supera el 80% durante los meses de invierno, descendiendo en torno al 25% durante los meses de verano. Destaca, por sus máximos relativos, la zona del sur de Portugal, ya que esta es la más alejada de la zona de generación habitual y dado que recibe *swells* tanto del NW como del SW, estos últimos menos frecuentes. Tanto en Sagres como en Brest se puede apreciar el detrimento en  $P_{high}$  ocasionado por los vientos poco favorables, vientos alisios en el caso de Sagres y del oeste en el caso de Brest. En el caso de Thurso, zona de latitudes altas, es posible observar el efecto del *Comfort Index*,  $I_c$ , que disminuye drásticamente el  $P_{high}$  en esta zona. En el resto de localidades el efecto térmico es algo menor restringiendo su acción a los meses invernales.

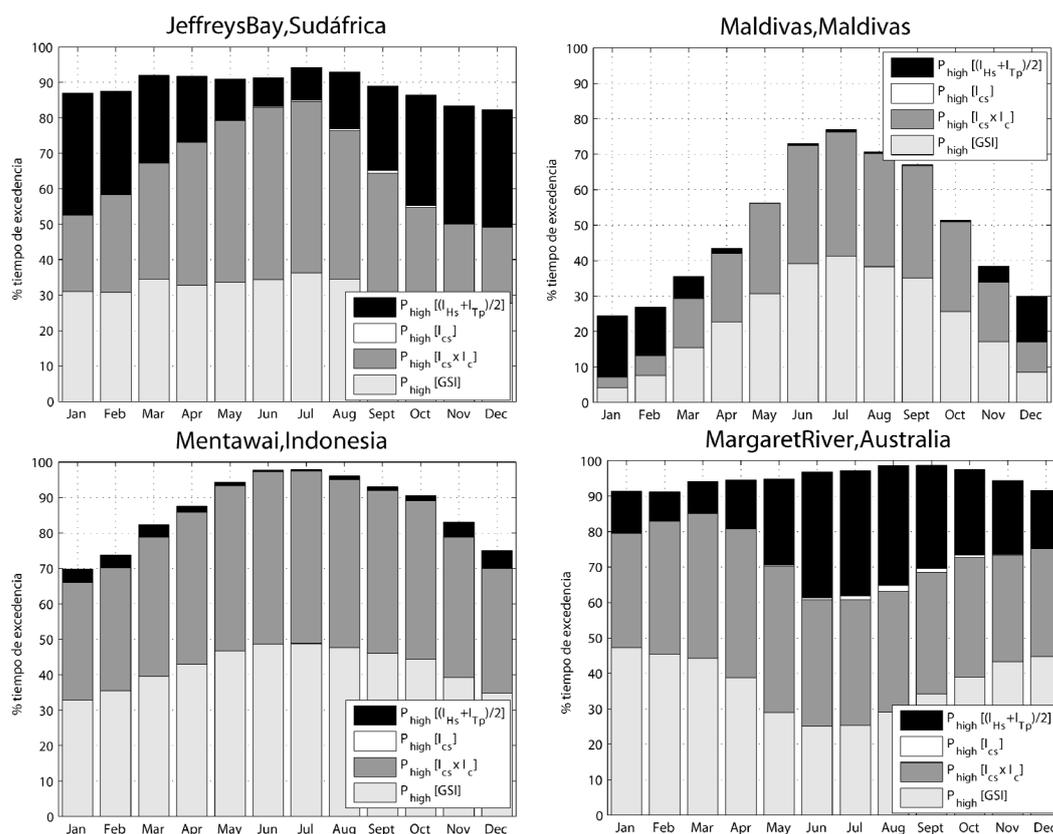


Figura 5.33. Distribución mensual de  $P_{high}$  en zonas de surf del Océano Índico.

En la figura 5.33 se muestra la distribución mensual de  $P_{high}$  de las zonas seleccionadas en el Océano Índico. La ocurrencia de oleajes favorables en el Índico es de las más elevadas, con valores medios que rondan el 90% anual. La estacionalidad observada en  $P_{high}$  se corresponde con la esperable en el Hemisferio Sur, a excepción de Margaret River, que se ve muy afectado por la acción de los vientos del oeste, cambiando su patrón estacional a uno más parecido al del Hemisferio Norte. El efecto del viento también se aprecia en Jeffrey's Bay, especialmente durante los meses de verano, cuando éste tiende a tomar dirección del SW. Sin embargo, durante los meses centrales del año, el efecto de este factor es menor, ya que la dirección del viento suele adquirir mayor componente NW. El resto de zonas se encuentran en latitudes muy cercanas al ecuador, por lo que el viento deja de ser relevante. Debido a la gran distancia que tiene que recorrer el oleaje hasta llegar a las rompientes de Maldivas o Indonesia, el patrón estacional se ve acentuado, ya que muchos de los *swells* del verano austral no llegan a producir buenas condiciones de surf. A pesar de esto, el  $P_{high}$  en estas zonas no suele descender del 30% (60% de los días) a excepción de Maldivas que sufre una ausencia de oleaje más pronunciada durante los meses del verano austral.

En la figura 5.34 se muestra la distribución mensual de  $P_{high}$  para dos zonas localizadas en el Pacífico Norte, (North Shore, Hawai y San Clemente, California), una en el Pacífico sur (Chicama, Perú) y una última en el Atlántico Sur (Costa de Marfil).

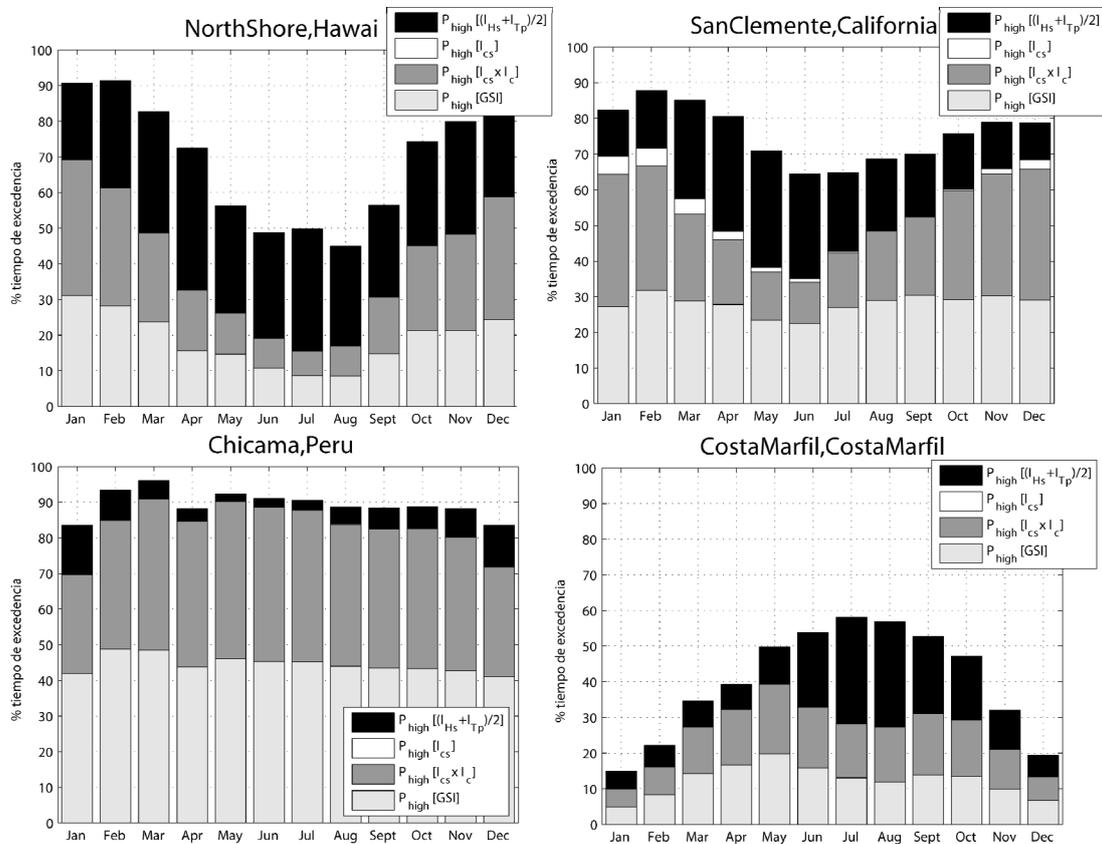


Figura 5.34. Distribución mensual de  $P_{high}$  en diversas zonas de surf.

En el panel superior de la figura 5.34, pueden compararse las condiciones de surf de la cara norte de las islas de Hawai con las de California. Llama la atención el alto valor de  $P_{high}$  en la costa californiana registrada durante los meses de verano, este hecho se debe a la incidencia de *swells* generados en el Hemisferio Sur que producen olas surfeables en California pero no en la North Shore. Respecto a las dos zonas localizadas en el Hemisferio Sur, resalta la diferencia en  $P_{high}$  de Chicama y Costa de Marfil. La costa sudamericana del Pacífico registra tasas de ocurrencia muy elevadas de buenas condiciones de surf, rondando el 40% durante todos los meses del año. Sin embargo, la costa atlántica sudafricana no alcanza el 20% en los mejores meses. Este hecho es debido al efecto en la propagación del oleaje generado por el Cabo de Hornos, creando una gran zona de sombra en todo el Atlántico Sur. En Costa de Marfil, a pesar de que los

oleajes favorables son más frecuentes durante Julio y Agosto,  $P_{high}$  es máximo durante los meses de Abril a Mayo debido a que el oleaje suele llegar acompañado de viento de mar.

## 5.7. Síntesis

En este capítulo se ha planteado una metodología para evaluar la disponibilidad de condiciones de surf. Ésta se basa en una serie de índices que evalúan de un modo objetivo y estandarizado los principales factores involucrados en diferentes escalas espaciales. La principal diferencia metodológica radica en la profundidad (distancia a la costa) a la que se realiza la evaluación del oleaje y el viento.

La evaluación se ha desagregado en tres subíndices ( $I_{cs}$ ,  $I_c$  e  $I_e$ ) que califican independientemente la idoneidad de cada uno de los factores. El  $I_{cs}$  califica el grado de idoneidad de las condiciones de oleaje y viento, integrando las variables:  $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_p$ ,  $W$ ,  $\theta_w$  dentro del  $I_{cs}$  en la escala global, incluyendo también las variables  $\kappa$  y  $\sigma$  en la escala regional. El  $I_{cs}$  puede variar en una escala 1-10; valores por debajo de 5 indican condiciones cuya probabilidad de generar olas surfeables al incidir en la costa es mínima; entre 5 y 7, indica una probabilidad moderada, y valores de  $I_{cs}$  superiores a 7 indican una alta probabilidad de generación de buenas condiciones de surf.

El  $I_c$  ha sido diseñado para incorporar el efecto de la temperatura en la percepción de la calidad de una sesión de surf, este subíndice solo es empleado en la evaluación global. El  $I_c$  considera la media ponderada de la temperatura media mensual de la superficie del mar y de la atmósfera ( $SST$  y  $ST$ ). El  $I_c$  evalúa esta nueva variable en una escala 0-1, con el objetivo de modificar el valor de  $I_{cs}$ . La hipótesis de evaluación radica en que el surfista necesitará de mejores condiciones de oleaje a medida que desciende la sensación térmica para obtener el mismo grado de satisfacción durante la sesión de surf.

El  $I_e$ , por su parte, incorpora el efecto de las variables nivel del mar y duración del día dentro de la evaluación global. El incorporar estas variables, permite estimar el tiempo real durante el cual es posible encontrar buenas condiciones de surf en una zona determinada, caracterizando la estacionalidad del recurso de una forma más rigurosa.

La principal ventaja que presenta el empleo de  $I_c$  es, por un lado, diferenciar aquellas zonas donde las variaciones de marea perjudican el oleaje para el surf de las que no, y por otro, diferenciar aquellas zonas en las que las mejores condiciones de surf coinciden con el periodo de menor duración de las horas de luz. Debido a que la variabilidad interanual de estas variables es inapreciable, el  $I_c$ , es solo utilizado para la caracterización media anual y estacional del recurso.

Una vez calificadas las condiciones horarias de surf mediante la combinación de los subíndices descritos, se calcula el tiempo de excedencia o probabilidad de que  $GSI$  sea mayor a un umbral establecido, pudiendo de esta manera analizar la variación en el tiempo de que  $P[GSI \geq X]$ , siendo  $X$  el umbral que marca la probabilidad de generación de unas u otras condiciones de surf, siendo:  $P_{low} = P[GSI < 5]$ ,  $P_{medium} = P[5 \leq GSI < 7]$  y  $P_{high} = P[GSI \geq 7]$  los tres niveles de calidad establecidos, de modo que  $P_{low} + P_{medium} + P_{high} = 1$ .

Por lo tanto, las ventajas que presenta la evaluación de las condiciones de surf mediante un índice genérico y sencillo son:

- Posibilita el análisis de la probabilidad de ocurrencia de condiciones de surf a una escala global y regional.
- Permite la comparación objetiva de unas zonas con otras, siendo posible cuantificar, con un valor estandarizado (excedencia media anual o mensual) la probabilidad de ocurrencia de buenas condiciones de surf .
- Permite analizar las variaciones estacionales reales del recurso, ya que agrega un gran número de variables (ocurrencia conjunta de las mismas) y no de forma independiente.
- Permite el análisis de las variaciones interanuales de las condiciones de surf. También posibilita el análisis de tendencias en el largo plazo, de una u otra de las categorías de calidad o probabilidad establecidas.

Lógicamente, la metodología empleada para evaluar las condiciones de surf de manera global, presenta una serie de limitaciones que han de ser tenidas en cuenta. Los rangos de calificación de cada una de las variables han de ser lo suficientemente amplios como para considerar las características específicas de cada tipo de rompiente, ya que cada una de ellas presenta unos umbrales propios de idoneidad en cuanto a la altura de ola, el periodo, etc. Este hecho, puede llevar a que en ciertos lugares, cuyas características locales (batimetría, orientación, topografía) sean muy específicas, la estimación mediante el índice sea más complejo. La evaluación local del recurso surf (escala de rompiente), ha de resolver otro tipo de procesos no considerados en la escala global. Para ello, se hace necesario un *downscaling* de oleaje y viento, así como la redefinición de unos rangos de idoneidad propios de las variables más relevantes dependiendo de las características propias de la rompiente analizada.

