

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

“A wave is never found alone, but is mingled with as many waves as there are uneven places in the object where the said wave is produced. At one and the same time there will be moving over the greatest wave of a sea innumerable waves proceeding in different directions”

Leonardo da Vince, *Codice Atlantico*

AGRADECIMIENTOS

Han sido tantas las personas que me han guiado hasta llegar a este momento, que si tuviera que citar a todas, me quedaría una sección de agradecimientos demasiado larga para una tesis; si, una tesis doctoral, quien lo iba a decir hace unos años. En primer lugar, quiero dejar constancia de mi agradecimiento a quienes han sido mis verdaderos maestros durante este tiempo, a los doctores Fernando Méndez e Iñigo Losada, a los que nunca podré corresponder tantos años de conocimiento, apoyo y motivación. Por la valentía demostrada al no dudar en enfrentarse a un tema nuevo para ellos como es el surf, por sus brillantes ideas y consejos, y por su trato cercano y sincero, os estaré siempre agradecido. Mi más sincera gratitud, para el Dr. Raúl Medina, pues él me vio llegar a Santander, me apasionó con sus clases magistrales y me abrió las puertas a este apasionante mundo de la ciencia de las olas.

A mis compañeros de IH Cantabria, con los que voy a la playa, con los que he pasado tan buenos momentos, muchas gracias a todos, en especial a los que me han ayudado en este trabajo: a Paula, sin tu máxima disimilitud, todo esto hubiera sido más difícil, a Borja y Melisa, porque con vuestras ejecuciones ya sé donde están las mejores olas del mundo, a Antonio y a Roberto, porque los modelos no siempre dicen la verdad, a Vero, que tanto se peleó con los tipos de tiempo.

Y como no, quiero agradecerte esto a ti, que seguro que eres la primera persona en leer lo que escribo. Porque eres capaz de iluminar los días grises de Santander, por tu apoyo incondicional y comprensión, y por llevarme siempre por el buen camino, gracias Cristina, a ti y a quien tienes dentro, que aunque todavía no sabemos su nombre, su simple existencia me da fuerzas cada día.

No podría terminar esta sección, sin agradecer esta tesis a mis padres. A mi padre, Antonio, porque siempre tiene preguntas sin respuesta. A mi madre, Dolores, por su amor infinito, su capacidad de sacrificio y sus ganas de vivir.

Por último, gracias al viento del oeste que soplas muy lejos de aquí, porque sin ti, las playas del Cantábrico serían mucho más aburridas.

RESUMEN

El deporte del surf se presenta, hoy día, como una marca de identidad cuyo poder de atracción turística crece exponencialmente. Los destinos de surf han de poseer una serie de características que hagan atractiva la visita de los turistas movidos por este motivo. Entre ellas, la ocurrencia de condiciones meteo-oceanográficas favorables es la más demandada por la mayor parte de las personas que practican el turismo del surf. El poder de atracción de este deporte es tal que, en muchos lugares del mundo, se han proyectado y construido arrecifes artificiales encaminados a producir una forma de rotura adecuada para el surf, cuyo presupuesto supera los 3 millones de euros (Bournemouth (UK) ó Kovalam (India)). Así, la realización de estudios de clima marítimo que permitan identificar localizaciones óptimas es una tarea primordial para el desarrollo de este tipo de proyectos. Del mismo modo, tanto las operadoras turísticas especializadas, como aquellas comunidades costeras vinculadas al surf se ven en la necesidad de cuantificar la disponibilidad de esta parte fundamental del recurso, ya que esta información les permite ofrecer un mejor servicio. El recurso surf es altamente dependiente del comportamiento del clima, por lo que son esperables variaciones estacionales y de unos años a otros. Además, las evidencias de cambio climático despiertan un interés creciente por conocer como éste está afectando a la ocurrencia de condiciones favorables para el surf.

Esta tesis está dedicada al estudio de la variabilidad espacio-temporal de las condiciones de surf, abordando distintas escalas espaciales en las cuales intervienen diferentes procesos. En lo referente a las escalas temporales, ha sido necesario

caracterizar la distribución media del recurso, la variabilidad estacional o mensual y las tendencias de largo plazo.

No se han encontrado en la literatura estudios científicos que establezcan metodologías claras para evaluar la disponibilidad de este recurso a partir de variables meteo-oceanográficas existentes. Sin embargo, hoy día, existen bases de datos muy fiables de las principales variables meteo-oceanográficas involucradas que permiten la evaluación específica del mismo. El carácter global de estas bases de datos permite evaluar el recurso surf en todo el mundo, aspecto que ha demostrado tener un interés general para una buena parte de la población.

Un paso previo antes de analizar la distribución espacial y la variabilidad temporal de las condiciones de surf es el establecimiento de criterios de evaluación que permitan trabajar de manera conjunta con todas las variables consideradas. Para ello, se ha realizado una profunda búsqueda bibliográfica con el fin de obtener los rangos preferenciales del surfista medio en relación a la altura de ola, temperatura y todos aquellos aspectos que mayormente rigen la elección de un destino de surf. Una vez establecidos y validados los criterios, es posible calcular la calidad de las condiciones de surf en cualquier lugar, siempre que se disponga de datos cuantitativamente fiables para ello. Por este motivo, antes de estudiar la variabilidad climática de las condiciones de surf, los datos empleados han sido calibrados y posteriormente validados.

En esta tesis han sido abordadas las escalas espaciales global y regional, sin perder de vista los procesos que gobiernan la surfeabilidad a escala de rompiente. En la escala global no es posible resolver con detalle todos los procesos que sufre el oleaje desde que es generado por el viento hasta que rompe en la costa en forma de olas surfeables. Del mismo modo, existen una serie de elementos diferenciadores como son la temperatura del agua o la marea astronómica que pueden variar enormemente de unos lugares a otros. En la escala regional, estos aspectos carecen de ese poder diferenciador, siendo la “limpieza” del oleaje el factor más relevante en la calidad de condiciones de surf.

El estudio de la variabilidad climática de las condiciones de surf ha sido abordado siguiendo la misma metodología en las dos escalas espaciales planteadas. Primero se ha calculado la distribución espacial en términos de frecuencia o tasa de ocurrencia,

vinculando los resultados obtenidos con procesos atmosféricos de macro escala (ej. tormentas extratropicales) y con los procesos de generación de oleaje y propagación por aguas profundas en la escala global. En la escala regional, además de los fenómenos indicados, intervienen otros de menor escala como son los procesos de propagación de oleaje por aguas someras, o los procesos meso-escalares en el comportamiento del viento (ej. brisas térmicas).

Los resultados obtenidos en el análisis global muestran un claro gradiente zonal y meridional en la disponibilidad de condiciones de surf, siendo éstas mucho más frecuentes en el Hemisferio Sur y en la cara oeste de los continentes. El análisis estacional revela un marcado ciclo anual en el Atlántico Norte en relación a los resultados obtenidos en otras cuencas. Sin embargo, la variabilidad observada en las costas tropicales del Hemisferio Sur es mucho más suave, respondiendo al patrón zonal de circulación atmosférica, la cual es mucho más persistente en esta parte del globo.

El análisis de la variabilidad interanual ha sido abordado mediante un modelo estadístico que correlaciona la probabilidad de ocurrencia mensual de condiciones de surf en un punto con los modos temporales de ciertos modos preferenciales de variabilidad atmosférica que han demostrado controlar el clima, tanto a escala regional como global. Así, el estudio de la correlación de las condiciones de surf con el fenómeno de El Niño revela un patrón donde las costas de California ven incrementada la probabilidad de ocurrencia de condiciones favorables, mientras que en la costa este de Australia éstas se ven perjudicadas. Los patrones regionales, como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), han demostrado ejercer un efecto mucho más intenso en ciertas zonas. Este es el caso de la costa de Portugal y norte de España, que se ven muy favorecidas durante fases positivas de este índice. El estudio de las tendencias muestra un incremento de la actividad de los vientos del oeste en ambos hemisferios. Este hecho provoca un aumento generalizado de la disponibilidad de condiciones de surf a excepción de las costas ecuatoriales orientadas al este.

En la escala regional, gracias al empleo de las técnicas más novedosas para la transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la costa, es posible resolver el oleaje con un alto nivel de detalle. Del mismo modo, es posible disponer del espectro direccional del oleaje con el cual sería muy costoso trabajar en la escala global.

Esto mejora cualitativamente la calidad del análisis realizado, pues el espectro contiene gran cantidad de información que no es posible obtener mediante el análisis de los parámetros agregados. La zona elegida para aplicar la metodología desarrollada ha sido el Cantábrico Oriental. Los resultados muestran un patrón espacial claramente dominado por la batimetría y los contornos de costa, que responde al los oleajes típicos de la zona, mostrando diferentes grados de calidad en función de la orientación y los elementos geomorfológicos colindantes. El estudio de la variabilidad estacional muestra una clara diferenciación entre las mejores zonas para la práctica del surf. En invierno, debido a la mayor intensidad del oleaje y a los vientos dominantes del NW, W y SW, las zonas localizadas en ensenadas y con orientación ENE son las que mayor disponibilidad de condiciones de surf presentan. Este patrón se invierte durante el verano, ya que el tamaño del oleaje es mucho menor, siendo los vientos más frecuentes del NE. La zona de estudio muestra acusadas variaciones interanuales, siendo la Oscilación del Ártico (AO), la NAO y el patrón del Atlántico Este (EA) las que mayor efecto ejercen en la zona.

Por último, se ha planteado un nuevo enfoque para el análisis de la variabilidad de las condiciones de surf en la escala regional basado en la climatología sinóptica. Esta metodología se basa en el análisis de los gradientes de presión 3-diaros clasificados mediante técnicas estadísticas como k-medias o redes neuronales auto organizativas (SOM). La ventaja que ofrece esta metodología es la de ser una útil herramienta de visualización, en la que los tipos de tiempo aparecen ordenados en una retícula bidimensional, existiendo una relación unívoca entre cada patrón atmosférico y la probabilidad de ocurrencia de condiciones de surf. Este método se ha completado por medio de los espectros medios 3-diaros calculados en un punto de aguas profundas y otro en las inmediaciones de Mundaka. De modo que se combinan la climatología sinóptica, el análisis espectral del oleaje y el análisis estadístico de las condiciones de surf. Esta metodología ha sido además planteada en la escala anual, aunque su utilidad es innegable en el análisis del largo y muy largo plazo (proyecciones de cambio climático).

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABLAS.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXXVI
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	XXIX

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.....	1
1.2. Motivación.....	2
1.3. Reseña histórica.....	7
1.4. Fundamentos del surf.....	10
1.5. Planteamiento del problema.....	19

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción.....	25
2.2. Parámetros que definen la surfeabilidad a escala de rompiente	25
2.2.1. Altura de ola en rotura, H_b	26
2.2.2. Ángulo de rotura, <i>wave peel angle</i>	26
2.2.2.1. El ángulo de rotura en una rompiente de surf	30

2.2.3. Intensidad o forma de rotura	33
2.2.4. Longitud de la sección.....	36
2.2.5. Factores que modifican los parámetros de surfeabilidad	36
2.2.5.1. Viento	36
2.2.5.2. Corrientes	38
2.2.5.3. Marea astronómica	39
2.2.6. Conclusiones referentes a la surfeabilidad a escala de rompiente.....	41
2.3. Introducción a la teoría del oleaje.....	43
2.3.1. Análisis del oleaje a corto plazo: descripción espectral del estado de mar	45
2.3.2. Parámetros espectrales.....	49
2.3.3. Descripción del oleaje a largo plazo: clima marítimo	57
2.3.4. Generación de olas para el surf, estados de mar tipo <i>windswell</i> y <i>groundswell</i>	58
2.3.5. Transformación y deformación del espectro a causa de los procesos de propagación	67
2.4. Clima y variabilidad climática.....	72
2.4.1. El sistema climático	72
2.4.1.1. Circulación general de la atmósfera	73
2.4.1.2. Circulación general de los océanos	76
2.4.1.3. Ciclones extratropicales, ciclones tropicales y vientos alisios.....	79
2.4.2. Variabilidad del sistema climático	83
2.4.2.1. Patrones de variabilidad climática. Índices Climáticos.....	85
2.4.3. Variabilidad climática del oleaje	98

CAPÍTULO 3: OPORTUNIDAD, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

3.1. Oportunidad de la tesis.....	103
3.2. Objetivos	106
3.3. Metodología	107
3.4. Organización de la tesis	109

CAPÍTULO 4: BASES DE DATOS

4.1. Introducción..... 111

4.2. Variables oceanográficas 111

 4.2.1. Datos históricos de oleaje. Boyas..... 111

 4.2.2. Datos remotos de oleaje, satélites..... 113

 4.2.3. Datos de oleaje de reanálisis, modelo numérico..... 115

 4.2.4. Datos de nivel del mar, mareógrafos 119

 4.2.5. Datos de nivel del mar, TPOX7 120

4.3. Variables atmosféricas..... 121

 4.3.1. Datos de viento, modelo numérico..... 121

 4.3.2. Datos de temperatura del aire, instrumental..... 123

 4.3.3. Datos de temperatura de la superficie del océano, instrumental..... 124

 4.3.4. Datos históricos de presión a nivel del mar, modelo numérico..... 126

 4.3.5. Series temporales de índices climáticos, instrumentales..... 126

CAPÍTULO 5: ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DEL RECURSO SURF

5.1. Introducción..... 127

5.2. Planteamiento del problema, escalas espaciales 128

5.3. Coastal Swell Index, I_{CS} 131

 5.3.1. Variables involucradas 134

 5.3.2. Criterios para el cálculo de I_{CS} 136

 5.3.2.1. Evaluación del efecto de la altura de ola significativa, I_{Hs} 136

 5.3.2.2. Evaluación del efecto del periodo de pico, I_{Tp} 140

 5.3.2.3. Evaluación del efecto del viento, I_W 143

 5.3.2.4. Evaluación del efecto de la forma espectral, I_{SQI} 148

 5.3.3. Cálculo de I_{CS} 150

5.4. Comfort index, I_c 151

 5.4.1. Variables involucradas 152

 5.4.2. Criterios para el cálculo de I_c 155

5.5. Effective index, I_e 158

 5.5.1. Variables involucradas 159

5.5.1.1. Duración del día, I_{Day}	159
5.5.1.2. Marea astronómica, I_{Tide}	165
5.6. Agregación de los subíndices descritos	169
5.6.1. Ejemplos de aplicación	171
5.6.1.1. Comparación objetiva de la ocurrencia de condiciones de surf, identificación de factores favorables y desfavorables	171
5.7. Síntesis	179

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CONDICIONES DE SURF EN EL GLOBO

6.1. Introducción	183
6.2. Metodología	184
6.3. Bases de datos	188
6.3.1. Reanálisis atmosférico, viento	189
6.3.2. Reanálisis de oleaje	190
6.3.3. Datos remotos de oleaje, satélites	190
6.3.4. Datos históricos de oleaje, boyas	190
6.3.5. Datos de nivel del mar, modelo numérico	191
6.3.6. Datos de temperatura del aire y del mar	191
6.4. Análisis de la ocurrencia de estados de mar tipo <i>groundswell</i> y <i>windswell</i>	191
6.4.1. Variabilidad estacional de los estados de mar tipo <i>groundswell</i> y <i>windswell</i>	196
6.5. Análisis de la distribución espacial de las condiciones de surf en base a los subíndices I_{cs} , I_c e I_e	201
6.5.1. Validación de los datos de partida	201
6.5.2. Validación de los criterios empleados	206
6.5.3. Distribución espacial de las condiciones de surf definidas en función del I_{cs} ...	214
6.5.4. Distribución espacial de las condiciones de surf definidas en función de $I_{cs}; I_c$	226
6.5.5. Distribución espacial de las condiciones de surf definidas en función de GSI	229
6.6. Variabilidad interanual de las condiciones de surf de alta calidad	234
6.6.1. Modelo de regresión para la variabilidad interanual	236
6.6.2. Influencia de los índices climáticos en la ocurrencia de las condiciones de surf de alta calidad	238

6.7. Análisis de la variabilidad en el largo plazo del recurso surf, tendencias	254
6.7.1. Tendencias en base a la regresión local	255
6.8. Conclusiones.....	263

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CONDICIONES DE SURF EN EL CANTÁBRICO ORIENTAL

7.1. Introducción	267
7.2. Descripción de la zona de estudio	268
7.2.1. Geología y sedimentos.....	269
7.2.2. El clima en el Cantábrico Oriental	271
7.2.3. Las mareas.....	273
7.2.4. Los <i>spots</i> de surf en la zona de estudio	274
7.2.5. Variabilidad temporal de los fondos para el surf	282
7.3. Metodología para el estudio de las condiciones de surf a pie de rompiente	283
7.4. Bases de datos utilizadas	286
7.4.1. Batimetrías	286
7.4.2. Bases de datos instrumentales.....	287
7.4.2.1. Mareógrafos	288
7.4.2.2. Boyas de medida de oleaje.....	289
7.4.2.3. Datos de oleaje de altímetros satelitales.....	290
7.4.3. Bases de datos procedentes del modelado numérico	291
7.4.3.1. Reanálisis atmosférico.....	291
7.4.3.2. Reanálisis de oleaje.....	292
7.5. Selección de mallas	293
7.6. Calibración del oleaje.....	294
7.7. Clasificación y selección de los estados de mar a propagar.....	300
7.7.1. Algoritmo de máxima disimilitud (MaxDiss)	301
7.7.2. Selección de los estados de mar a propagar	303
7.8. Transferencia del oleaje de aguas profundas a aguas someras.....	312
7.8.1. Características de la librería de casos generada.....	319
7.9. Reconstrucción de series temporales horarias de parámetros espectrales	320
7.9.1. Validación de las series temporales horarias	325

7.10. Análisis de la ocurrencia de condiciones surfeables en el Cantábrico oriental	329
7.10.1. Análisis del oleaje en profundidades indefinidas a partir de parámetros espectrales.....	330
7.10.2. Régimen medio anual de condiciones de surf	343
7.10.3. Climatología de las de condiciones de surf de alta calidad, $P_{high}[RSI]$	345
7.10.4. Variabilidad interanual en la ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad, $P_{high}[RSI]$	349
7.10.5. Análisis de la evolución de las condiciones de surf de alta calidad en el largo plazo, $P_{high}[RSI]$	352
7.11. Conclusiones.....	355

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE SURF MEDIANTE TIPOS DE TIEMPO

8.1. Introducción.....	359
8.2. Zona de estudio y datos utilizados	360
8.2.1. Datos atmosféricos.....	361
8.2.2. Datos correspondientes al recurso surf.....	362
8.3. Clasificación de la atmósfera.....	362
8.3.1. Técnica de clasificación k -medias.....	364
8.3.2. Tipos de tiempo.....	365
8.4. Análisis regional del recurso surf: Santander	369
8.5. Análisis local del recurso surf: Mundaka.....	375
8.6. Conclusiones.....	384

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

9.1. Conclusiones	387
9.2. Resumen de aportaciones.....	388
9.3. Resumen de resultados.....	390
9.4. Futuras líneas de investigación.....	393

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1. Bienvenida a Cook en Kealakeke Bay. Fuente: http://www.llstudents.org ...	8
Figura 1.2. Partes de una ola. Izquierda de la Ría, Liencres (Cantabria). Fuente: www.surfcantabria.com	14
Figura 1.3. Ejemplo de zonas de surf, los vectores rojos indican la dirección del viento dominante. Fuente: Google Earth.....	16
Figura 1.4. Ejemplo de rompientes de surf en salientes de tierra. Rincon, California (izquierda), Kirra, Australia (derecha). Fuente: Google Earth.....	17
Figura 1.5. Rompiente de playa en las Landas (Francia). Fuente: http://www.surf-much.com	17
Figura 1.6. Rompiente de playa arrecife, Pedra Branca (Portugal). Fuente: http://www.globalsurfers.com	18
Figura 1.7. Rompiente de desembocadura, Mundaka (Vizcaya). Fuente: www.surf30.com	19
Figura 1.8. Slab, Shipsterns Bluff (Tasmania). Fuente: www.coastalwatch.au	19
Figura 1.9. Esquema conceptual del problema planteado, escalas espaciotemporales, procesos y aproximaciones.	22

Capítulo 2

Figura 2.1. Ilustración del vector celeridad de onda, \vec{v}_w ; vector velocidad de rotura longitudinal del frente o <i>peel rate</i> , \vec{v}_p ; velocidad de desplazamiento del surfista, \vec{v}_s ; y ángulo de rotura ó <i>peel angle</i> , α_i . Fuente: Google Earth, elaboración propia.	27
Figura 2.2. Ángulo de rotura en función de la altura de ola y el nivel de destreza del surfista (Hutt <i>et al.</i> , 2001).....	29
Figura 2.3. Incidencia oblicua del oleaje en una playa con batimetría recta y paralela y <i>peel angle</i> , (Henriquez <i>et al.</i> , 2004).....	30
Figura 2.4. Ángulo de rotura en función del peralte de la ola para un playa con batimetría recta y paralela; ángulo de incidencia, $\theta_0 = 66^\circ$ (Henriquez <i>et al.</i> , 2004)	32
Figura 2.5. Esquematización de la batimetría de un arrecife de surf. Tomado de Mead y Black (2001b).	32
Figura 2.6. Patrones de surf en función de la dirección del oleaje incidente en la zona de surf californiana de Trestles. Fuente: www.surflines.com	33
Figura 2.7. Ilustración de los parámetros empleados para el cálculo del índice del vórtice Tomado de Mead y Black (2001c).....	35
Figura 2.8. Efecto del viento en la localización del punto de rotura. Descrestamiento (izquierda), voluta (derecha). King y Baker (1996).....	37
Figura 2.9. Amplitud de las componente astronómicas M2 y K1 en cm, líneas cotidales y pintos anfídromicos. Fuente: http://www.aviso.oceanobs.com	39
Figura 2.10. Esquema de funcionamiento de una rompiente en relación al nivel de marea. Elaboración propia.....	40
Figura 2.11. Análisis del oleaje a corto y largo plazo. a) Envolventes superior e inferior de la serie temporal de desplazamiento vertical de la superficie libre. b): Ampliación de un estado de mar del registro anterior.c): serie temporal del parámetro de estado de mar H_s y T_m , obtenidos del análisis espectral de los estados de mar del registro a).	44
Figura 2.12. Descripción de la superficie libre del mar mediante el sumatorio de infinitas componentes sinusoidales con dirección, amplitud, frecuencia y fase diferentes. Tomada de Holthuijsen (2007).....	46
Figura 2.13. Ejemplo de un oleaje de generación por viento o <i>sea</i> (izquierda) y un oleaje en el que se combinan mar de viento y mar de fondo o <i>swell</i> (derecha).	47

Figura 2.14. Ejemplo de un oleaje en la zona de generación o <i>sea</i> (izquierda), y de un oleaje fuera del área de generación tipo <i>swell</i> (derecha). Fuentes: http://www.bbc.co.uk , http://www.surfing-waves.com .	48
Figura 2.15. Ejemplo de espectro direccional	49
Figura 2.16. Espectro de un estado de mar con $H_s=6.93$ m. $T_m=9.89$ s, $\theta_m=90.2^\circ$ generado en el Mediterráneo.	51
Figura 2.17. Espectro de un estado de mar con $H_s=3.02$ m. $T_m=6.9$ s, $\theta_m=124.8^\circ$ generado en el Mediterráneo.	51
Figura 2.18. Espectro de un estado de mar con $H_s=2.84$ m. $T_m=7.20$ s, $\theta_m=323.4^\circ$ generado en el Mediterráneo.	52
Figura 2.19. Relación entre el parámetro de forma espectral κ y el γ del espectro JONSWAP. Elaboración propia.	54
Figura 2.20. Superficie libre con κ alto (izquierda) y bajo (derecha).	54
Figura 2.21. Superficie libre correspondiente a un espectro JOSWAP de $H_s=2$ m y $T_p=12$ s y con diferentes γ y σ . Elaboración propia.	56
Figura 2.22. Frecuencias y periodos típicos de los movimientos verticales del océano. Reproducción de Holthuijsen (2007).	58
Figura 2.23. <i>Groundswell</i> en Huntington Beach, California (izquierda) y <i>windswell</i> en Cornwall, UK (derecha). Fuente: http://www.surfblogspot.com .	60
Figura 2.24. <i>Swell window</i> o <i>fetch</i> efectivo para un punto del Atlántico Norte. Elaboración propia.	62
Figura 2.25. Gráfico de dispersión de H_s (TOPEX) frente a W (Quik-SCAT). Las líneas muestran distintas relaciones empíricas entre H_s y W en estados de mar maduros. Tomado de Chen. <i>et al.</i> , 2002.	64
Figura 2.26. <i>Swell pools</i> (en rojo) y <i>sea pools</i> (azul). En verde se muestran las áreas donde ambos estados de mar adquieren la misma probabilidad de ocurrencia. Tomado de Chen. <i>et al.</i> (2002).	64
Figura 2.27. (a) Probabilidad global de ocurrencia de estados de mar tipo <i>swell</i> , (b) Altura de ola significativa media a partir de datos TOPEX y Quik-SCAT. Tomado de Chen <i>et al.</i> (2002).	65
Figura 2.28. Altura de ola significativa media anual y persistencia de los <i>swells</i> generados en el Índico Extratropical. Tomado de Alves (2006).	66

Figura 2.29. Patrón de crestas de un <i>windswell</i> refractando y asomerando en una playa con batimetría recta y paralela ($T_p=8.01$ s). Fuente: Goda, Y. (1992).....	68
Figura 2.30. Diagrama de refracción para oleaje regular. Fuente: Goda, Y. (2000).....	69
Figura 2.31. Diagrama de refracción para oleaje irregular.....	70
Figura 2.32. Propagación de un oleaje de temporal en el Cantábrico oriental. Se muestran los parámetros κ (panel superior) y σ (panel inferior). Elaboración propia.	71
Figura 2.33. Propagación del un oleaje típico de verano en el Cantábrico oriental. Se muestran los parámetros κ (panel superior) y σ (panel inferior). Elaboración propia.	71
Figura 2.34. Esquema general de circulación atmosférica. Fuente: http://hovanitz.com	75
Figura 2.35. Temperatura superficial del aire (ST) media mensual en grados centígrados. Reproducción de los datos de NECP/NCAR.	76
Figura 2.36. Esquema general de circulación superficial de los océanos. Fuente: http://mediateca.cl	77
Figura 2.37. Temperatura superficial del agua (SST) media mensual en grados centígrados. Reproducción de los datos de NECP/NCAR.	79
Figura 2.38. Trayectorias de las tormentas extratropicales (panel superior) y de los ciclones tropicales (panel inferior). Fuente: GISS/NASA, NHC/NOA y JTWC/US Navy.	82
Figura 2.39. Velocidad (m/s) y dirección del viento medio mensual durante el periodo 1971-2000, para los meses de Julio y Diciembre. Fuente: www.ecmwf.int	83
Figura 2.40. H_s media mensual en metros (líneas de contorno) y periodo medio (escala de colores), durante el periodo 1971-2000, para los meses de Julio y Diciembre. Fuente: www.ecmwf.int	83
Figura 2.41. Efecto de la fase positiva (izquierda) y negativa (derecha) del AO. Fuente: http://www.entremontanas.com	87
Figura 2.42. EOF 1 del neopotencial de 850 hPa entre el polo sur y los 20°S.	88
Figura 2.43. Esquema de la situación de vientos y estructura oceánica durante la fase negativa del ciclo ENSO (izquierda) y positiva (derecha). Fuente: South African Weather Service.	89
Figura 2.44. Elevación de la superficie libre asociada a El Niño, 1997 y la La Niña 1999. Fuente: www.jpl.nasa.gov/gallery/gallery.html	90

Figura 2.45. Regiones de medida de los índices Niño. Fuente: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//tropics/enso.htm	91
Figura 2.46. Evolución del índice NIÑO 3.4 (panel superior) y el SOI (panel inferior) en el mismo período de tiempo. Fuente: http://www.srh.noaa.gov/jetstream//tropics/enso.htm	92
Figura 2.47. Trayectoria de las borrascas en el Pacífico Norte durante el invierno 2009-10. Fuente: www.surflines.com	92
Figura 2.48. Fases positiva (izquierda) y negativa (derecha) de la NAO.....	95
Figura 2.49. Anomalías de temperatura superficial del agua en el océano Índico en la fase positiva del IOD en Noviembre de 1997. Fuente: http://www.bom.gov.au/climate/IOD/about_IOD.shtml	97

Capítulo 4

Figura 4.1. Localización de algunas de las boyas utilizadas en la validación de los datos de oleaje del reanálisis global GOW.1.0.....	113
Figura 4.2. Cobertura espacial del satélite Geosat Follow-On (GFO).....	114
Figura 4.3. Malla global del reanálisis GOW 1.0 (representación de la figura en proyección Mercator).	116
Figura 4.4. Rejillas del litoral español del reanálisis GOW 1.0 Malla. Malla Global 1.5° × 1.0°, Malla Iberia 0.5° y Mallas Cantábrico, Cádiz y Canarias 0.1° (representación de la figura en proyección Mercator).....	116
Figura 4.5. Validación en la boya NOAA 46003. Región: Pacífico Norte. Malla Global	117
Figura 4.6. Gráficos de dispersión y cuantiles para las boyas 32302 y 41040, localizadas en el Caribe. Obsérvese la presencia de un huracán en el registro de la boya 41040 (derecha).	118
Figura 4.7. RMS entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000	118
Figura 4.8. Bías entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000	119
Figura 4.9. SI entre el reanálisis GOW y datos de satélite. Periodo: Marzo a Mayo 2000.	119
Figura 4.10. Amplitud de la componente M2 (m) en el modelo TPX07. Fuente: http://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPX071.html	120

Figura 4.11. RMS, BIAS y SI de $W_{SeaWind}$ frente a $W_{satelite}$ 122

Figura 4.12. Variación de la anomalía mensual de la temperatura de la atmósfera. Fuente: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature>.124

Figura 4.13. Resolución espacial de la base de datos ERSST.v3b.125

Figura 4.14. Evolución de SST mensual en el periodo 1880-1005.125

Capítulo 5

Figura 5.1. Escalas espaciales planteadas. Análisis global (puntos amarillos) y regional (puntos verdes)..128

Figura 5.2. Ejemplo de oleajes de alta calidad, fuente: www.surflines.com.132

Figura 5.3. Diferentes grados de calidad del oleaje en *Lennox Head National Surfing Reserve*...134

Figura 5.4. Bawa en las islas Mentawai (izquierda), y Mavericks en California (derecha). Fuente: www.surfersvillage.com.137

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 θ_p . Los colores indican el valor de T_p139

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 km².141

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 θ_p . El color indica el valor de T_p143

Figura 5.8. Ejemplo de dos condiciones de oleaje similar en Bells Beach, Australia. Viento *onshore* (izquierda) y *offshore* (derecha).144

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).145

Figura 5.10. Criterio para la evaluación de las condiciones de viento en la escala global, $\beta = 0^\circ$146

Figura 5.11. Efecto del viento en la calidad del oleaje.....147

Figura 5.12. Criterio para la evaluación de las condiciones de viento en la escala regional, $\beta = 320^\circ$148

Figura 5.13. Encuesta realizada para obtener los criterios de evaluación de κ y σ . En los huecos se evalúa de 0 a 10 la calidad del estado de mar.....	149
Figura 5.14. Criterio de evaluación de κ y σ	149
Figura 5.15. Test de nueva gama de trajes de 6mm, Islandia. Fuente: www.surferstoday.com	152
Figura 5.16. Variabilidad anual de $[SST+ST]/2$ en Thurso, Escocia.....	153
Figura 5.17. Variabilidad anual de $[SST+ST]/2$ en Sagres, Portugal.....	154
Figura 5.18. Variabilidad anual de $[SST+ST]/2$ en Golfo Dulce, Costa Rica.....	155
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).	156
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).....	158
Figura 5.21. Duración del día en la Tierra. Fuente Wikipedia.	160
Figura 5.22. Efecto de la duración del día en la disponibilidad de condiciones de surf.164	
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).	165
Figura 5.24. Niveles de marea óptimos para las rompientes del Reino Unido. Fuente: <i>Climate Change- A surfer perspective</i>	166
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.	166
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).	168
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).....	171
Figura 5.28. Localización de las zonas de surf analizadas.....	172

Figura 5.29. Comparativa de la tasa de ocurrencia media anual de las condiciones de surf.	172
Figura 5.30. Condiciones favorables y desfavorables de los diferentes elementos considerados en la zona de surf de Mundaka.	173
Figura 5.31. Distribución mensual de P_{high} en zonas de surf de la margen este de los continentes.	175
Figura 5.32. Distribución mensual P_{high} en zonas de surf de la margen oeste de los continentes.	176
Figura 5.33. Distribución mensual de P_{high} en zonas de surf del Océano Índico.....	177
Figura 5.34. Distribución mensual de P_{high} en diversas zonas de surf.....	178

Capítulo 6

Figura 6.1. Esquema general de la metodología utilizada en la evaluación global de las condiciones de surf.	185
Figura 6.2. Esquema de la metodología planteada.....	186
Figura 6.3. <i>Groundswell</i> en Tasmania, Australia.	192
Figura 6.4. Histogramas de $P[T_p(H_s \geq 1)]$, en diferentes localizaciones.	193
Figura 6.5. Distribución espacial de la probabilidad de ocurrencia media anual de estados de mar tipo <i>groundswell</i> (panel superior) y <i>windswell</i> (panel inferior).	194
Figura 6.6. Probabilidad de ocurrencia mensual de estados de mar tipo <i>groundswell</i>	197
Figura 6.7. Probabilidad de ocurrencia mensual de estados de mar tipo <i>windswell</i>	200
Figura 6.8. Localización de las boyas empleadas en la validación.....	202
Figura 6.9. Gráficos de dispersión correspondientes a la comparación de $P_{high}[I_{cs}]$ calculado con datos instrumentales y modelados.....	204
Figura 6.10. Comparación de $P_{high}[I_{cs}]$ medio mensual calculado con datos instrumentales y modelados.	206
Figura 6.11. Cuadro de estadística estacional de las condiciones de surf. Fuente: <i>The World Stormrider Guide</i> , volumen 1.....	207
Figura 6.12. Distribución mensual de $P_{high}[GSI]$ en Taghazoute. Las líneas rojas representan los percentiles de 0.3 y 0.6.	208

Figura 6.13. Validación relativa del GSI frente a los valores relativos de $P_{high}[GSI]$ y los dados por la guía, <i>The World Stormrider Guide</i> , volumen 1.....	209
Figura 6.14. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Gold Coast, Australia. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	211
Figura 6.15. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Bells Beach, Australia. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	211
Figura 6.16. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Santa Catarina, Brasil. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	212
Figura 6.17. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Jeffreys Bay, Sudáfrica. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	212
Figura 6.18. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Teahupo, Tahiti. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	212
Figura 6.19. Variabilidad mensual $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Trestles, California. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	213
Figura 6.20. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Hossegor, Francia, California. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	213
Figura 6.21. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Peniche, Portugal. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	213
Figura 6.22. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Puerto Rico. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	214
Figura 6.23. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$ y ejemplo de las condiciones de surf acontecidas durante la prueba del circuito ASP 2009-2010, en Pipeline, Hawái. Fuente imagen: www.aspworldeatour.com	214
Figura 6.24. Ejemplo de la orientación media de la costa en Australia.....	215

Figura 6.25. Distribución espacial de $P_{high}[I_{cs}]$ (panel superior) y $P_{medium}[I_{cs}]$ (panel inferior).	216
Figura 6.26. Variabilidad mensual de $P_{high}[I_{cs}]$.	219
Figura 6.27. Imagen aérea de Chicama, Perú. Fuente: Google Earth 2010.	223
Figura 6.28. Península de Bukit, Bali. Zonas de surf en función de la direccionalidad estacional del viento. Fuente: Google Earth 2010.	224
Figura 6.29. Distribución espacial de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$.	226
Figura 6.30. Variabilidad mensual de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$.	228
Figura 6.31. Distribución espacial de $P_{high}[GSI]$.	230
Figura 6.32. Variabilidad mensual de $P_{high}[GSI]$.	232
Figura 6.33. Portadas de la revista Surfer (Junio y Julio 1983).	234
Figura 6.34. Serie temporal del índice Niño3. Se ha señalado inviernos destacables para el surf californiano. Fuente: NOAA.	235
Figura 6.35. Correlación entre el índice NAO y $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ normalizado en un punto del Cantábrico	237
Figura 6.36. Patrones climáticos analizados.	239
Figura 6.37. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice el Niño3. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	240
Figura 6.38. Vientos medios en superficie durante los inviernos Niño (abajo) y Niña (arriba). Fuente: http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl ...	242
Figura 6.39. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice AO. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	244
Figura 6.40. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice SAM. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	246
Figura 6.41. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice NAO. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	247
Figura 6.42. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice EA. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	249
Figura 6.43. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice PNA. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	250
Figura 6.44. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice WP. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	251

Figura 6.45. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice DMI. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	252
Figura 6.46. Correlación lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ con el índice PDO. Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	253
Figura 6.47. Tendencia lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ (horas/año). Con asteriscos se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	256
Figura 6.48. Tendencia lineal en $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ observado en la costa este australiana.	257
Figura 6.49. Tendencia lineal de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ observada en la costa de California (izquierda) y Portugal (derecha).	258
Figura 6.50. Tendencia lineal en H_s media anual (m/año). Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	258
Figura 6.51. Tendencia lineal de T_p medio anual (s/año) . Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	259
Figura 6.52. Tendencia lineal en W medio anual (ms^{-1} /año). Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	260
Figura 6.53. Tendencia lineal en $r_{[\theta_w]}$ (horas/año) considerando sectores direccionales de 45°	261
Figura 6.54. Tendencia lineal en $[SST+ST]/2$ medio anual ($^{\circ}C/año$). Con asteriscos negros se resaltan los puntos cuya significancia es superior al 95%.	262
Figura 6.55. Tendencia estacional de $P_{high}[I_{cs} \cdot I_c]$ (horas/año).	263

Capítulo 7

Figura 7.1. Plataforma de abrasión sobre estratos sedimentarios buzados en Meñakoz, Vizcaya.	270
Figura 7.2. Playa de Berria, Cantabria.	271
Figura 7.3. Temperatura media mensual del agua (SST) y del aire (ST) durante los años 2009-2010 en la posición de la boya de Santoña.	272
Figura 7.4. Vista aerea del estuario de Urdaibai, Vizcaya.	273
Figura 7.5. Ola rompiendo sobre la barra de arena de la Ría de Liencres. Fuente: www.surfcantabria.com.	274
Figura 7.6. Distribución espacial de las rompientes de surf en la zona de estudio.	275
Figura 7.7. El Brusco, Noja. Fuente: www.surfcantabria.com.	275

Figura 7.8. La Isla de Santa Marina, Loredó. Fuente: www.surfcantabria.com	276
Figura 7.9. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función de su calidad.	278
Figura 7.10. Número de rompientes potencialmente operativas dependiendo del tamaño del oleaje al pie de la misma.....	278
Figura 7.11. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función del tipo de elemento batimétrico que provoca la rotura.....	279
Figura 7.12. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función de la intensidad de la rotura.....	280
Figura 7.13. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función del sentido de la rotura.....	280
Figura 7.14. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función de la longitud de la sección.....	281
Figura 7.15. Número de rompientes potencialmente funcionales dependiendo del nivel de marea.	281
Figura 7.16. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función del nivel de experiencia requerido.....	282
Figura 7.17. Clasificación de los <i>spots</i> de surf del Cantábrico Oriental en función de la intensidad de uso.....	282
Figura 7.18. Metodología de transferencia del oleaje desde profundidades indefinidas a aguas someras para el análisis de las condiciones de surf.....	286
Figura 7.19. Batimetría utilizada.....	287
Figura 7.20. Posición de las boyas de oleaje utilizadas en el estudio.....	289
Figura 7.21. Serie temporal (año 2007) de las variables $H_s, T_p, \theta_m, \kappa, \sigma$ obtenidas a partir del registro espectral de la REDEXT Bilbao.....	290
Figura 7.22. Datos de altimetría satelital disponibles en el área de estudio.....	291
Figura 7.23. Vientos del <i>downscaling</i> SeaWind NCEP en el área de estudio.....	292
Figura 7.24. Datos de reanálisis de oleaje disponibles en el área de estudio.....	293
Figura 7.25. Mallas seleccionadas y puntos calibrados en el contorno de la malla G01 (contorno verde). Las mallas de detalle, se muestran en color rojo.....	294
Figura 7.26. Datos de satélite utilizados para la calibración de un punto de la malla general de propagación.....	295

Figura 7.27. Cauntiles de altura de ola a optimizar (GOW y satélite) para la calibración de un punto de la malla general de propagación.	296
Figura 7.28. Rosa de calibración de H_s obtenida un punto GOW de la malla general de propagación.	298
Figura 7.29. Diagramas de dispersión y $QQplot$ de las alturas de ola de satélite versus GOW sin calibrar (izquierda) y calibrado (derecha).	299
Figura 7.30. Valor medio del coeficiente de corrección ($H_{s,c}/H_{s,GOW}$) por direcciones.	300
Figura 7.31. Serie temporal de $H_s(m)$ de los últimos 500 estados de mar disponibles en la serie de pares de datos.	300
Figura 7.32. Condiciones de oleaje y viento en la malla de propagación G01 y mapa de $H_s(m)$ de su correspondiente propagación.	303
Figura 7.33. Puntos de oleaje y viento utilizados en la selección (MaxDiss) de los casos representativos del clima marítimo de indefinidas en el área de estudio.	304
Figura 7.34. Situación de temporal y contribución de los 6 primeros EOFs.	307
Figura 7.35. Varianza explicada en función del número de EOFs. RMS de las variables estandarizadas en función de la varianza explicada (%).	308
Figura 7.36. RMS de las variables en función de la varianza explicada (%).	308
Figura 7.37. Distribución de los casos seleccionados correspondientes a los datos del punto 5 de oleaje y punto 2 de viento de los utilizados en la selección con MaxDiss. ..	310
Figura 7.38. Casos seleccionados con el algoritmo MaxDiss en la malla G01.	310
Figura 7.39. Esquema del proceso de selección de los casos representativos del clima marítimo con variabilidad espacial en indefinidas.	311
Figura 7.40. Propagación del Caso 95 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de la altura de ola significativa, dirección media del oleaje (vectores grises), dirección de pico (vectores negros), también se indica el valor de T_m y T_p	316
Figura 7.41. Propagación del Caso 95 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de dispersión frecuencial (A), dispersión direccional (B), viento y RSI (C).	317
Figura 7.42. Propagación del Caso 265 de la selección MaxDiss de la malla M03 del Cantábrico. Resultados de la altura de ola significativa, dirección media del oleaje (vectores grises), dirección de pico (vectores negros) , también se indica el valor de T_m y T_p (A), dispersión frecuencial (B), dispersión direccional (C), viento y RSI (D).	318

Figura 7.43. Esquema de la librería de casos generada a partir de los 500 casos seleccionados. 319

Figura 7.44. Esquema de la librería de espectros generada a partir de los 500 casos seleccionados en la posición de la boya REDEXT Bilbao..... 320

Figura 7.45. Interpolación RBF definida como una combinación de funciones radiales..... 322

Figura 7.46. Validación de las series temporales de los parámetros H_s , T_m , θ_m , κ y σ en la posición de la boya exterior de Bilbao (OPPE) correspondientes al año 2008. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul). 326

Figura 7.47. Validación de las series temporales de los parámetros H_s , T_m y θ_m en la posición de la boya costera de Virgen del Mar (Gobierno de Cantabria) correspondientes al año 2009. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul).....327

Figura 7.48. Validación de las series temporales de los parámetros H_s , T_m y θ_m en la posición de la boya costera de Santoña (Gobierno de Cantabria) correspondientes al año 2009. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul)..... 328

Figura 7.49. Validación de las series temporales de los parámetros H_s , T_m y θ_m en la posición de la boya costera de Bilbao (OPPE) correspondientes al año 2008. Serie reconstruida (rojo) y registro boya (azul). 328

Figura 7.50. Ejemplo de los puntos seleccionados para analizar. Los vectores representan la dirección media de cada tramo de costa. 330

Figura 7.51. Distribución de los valores medios de κ (panel izquierdo) y σ (panel derecho) en función de H_s y T_p en la posición de la boya exterior de Bilbao..... 331

Figura 7.52. Distribución de los valores medios de κ (panel izquierdo) y σ (panel derecho) en función de H_s y θ_m en la posición de la boya exterior de Bilbao. 332

Figura 7.53. Gráficos de cajas que muestran la variabilidad estacional de H_s , T_p y θ_m . En el panel izquierdo, el color indica la desviación en grados respecto a la dirección media del flujo de energía.333

Figura 7.54. Gráficos de cajas que muestran la variabilidad estacional de κ y σ 334

Figura 7.55. Variabilidad estacional (panel superior) y diaria (panel inferior) de la velocidad y dirección del viento.335

Figura 7.56. Serie temporal con ventana móvil anual de los parámetros H_s , T_p , κ y σ . El color indica la desviación en grados de la dirección media anual del flujo de energía respecto a la dirección media. 337

Figura 7.57. Serie temporal con ventana móvil anual de W . El color indica la desviación de la dirección media anual del viento en grados respecto a la dirección media.....	338
Figura 7.58. Modos espaciales obtenidos a través del análisis de componentes principales de las anomalías mensuales de SLP.....	339
Figura 7.59. Modos temporales obtenidos a través del análisis de componentes principales de las anomalías mensuales de SLP.....	340
Figura 7.60. Grafico de dispersión de H_s media mensual estandarizada frente a los valores mensuales del índice NAO.....	340
Figura 7.61. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones surfeables.	344
Figura 7.62. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones de surf de calidad alta, $P_{high}[RSI]$	344
Figura 7.63. Probabilidad de ocurrencia anual de condiciones de surf de calidad alta excepcional.	345
Figura 7.64. Probabilidad de ocurrencia estacional de condiciones de surf de calidad alta, $P_{high}[RSI]$	346
Figura 7.65. Climatología $P_{high}[RSI]$ en dos rompientes muy expuestas al oleaje dominante. Liencres (izquierda) y, Sopelana (derecha).....	347
Figura 7.66. Climatología de $P_{high}[RSI]$ en dos rompientes moderadamente expuestas al oleaje dominante. Zarautz (izquierda) y Mundaka (derecha).	348
Figura 7.67. Climatología de $P_{high}[RSI]$ en dos rompientes moderadamente protegidas del oleaje dominante. Sardinero (izquierda) y Laredo (derecha).	348
Figura 7.68. Climatología de $P_{high}[RSI]$ en dos rompientes con orientación SE. La Isla (izquierda), Jefrys (derecha).	349
Figura 7.69. Correlación lineal entre $P_{high}[RSI]$ mensual y los seis PCs de anomalías de SLP.	350
Figura 7.70. Correlación lineal entre $P_{high}[RSI]$ mensual y diferentes índices climáticos.	352
Figura 7.71. Tendencia lineal de $P_{high}[RSI]$ anual (horas/año).	353
Figura 7.72. Tendencia lineal de $P_{high}[RSI]$ anual (horas/año) en El Brusco.	353
Figura 7.73. Tendencia lineal de $P_{high}[RSI]$ anual (horas/estación).	354

Capítulo 8

Figura 8.1. Localización de las zonas de estudio en el Mar Cantábrico (panel superior). Área de Santander (panel inferior izquierdo) y <i>spot</i> de Mundaka (panel inferior derecho)	360
Figura 8.2. Área de influencia del Atlántico Norte.....	361
Figura 8.3. Primeros 6 EOF correspondientes a los gradientes de presiones medios 3-díarios en el área geográfica del Atlántico Norte (anomalías de presión, mb).....	363
Figura 8.4. Evolución temporal de los 6 primeros modos temporales estandarizados de los gradientes de presiones medios 3-díarios en el área geográfica del Atlántico Norte.....	363
Figura 8.5. Tipos de tiempo de gradiente de presiones medias 3-díarias (mb) del Atlántico Norte.....	366
Figura 8.6. Probabilidades de ocurrencia en la rejilla de k -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte	367
Figura 8.7. Probabilidades de ocurrencia por estaciones en la rejilla de k -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte.....	368
Figura 8.8. Probabilidades de ocurrencia por meses en la rejilla de k -medias de los tipos de tiempo del Atlántico Norte	368
Figura 8.9. Espectro medio 3-díario correspondiente al TT número 100 (cm). Posición en la boya de Bilbao	370
Figura 8.10. Espectro media 3 díario, asociado a cada tipo de tiempo (cm). Posición de la boya exterior de Bilbao.....	371
Figura 8.11. Espectro medio 3-díario correspondiente al TT número 3 (cm). Posición en la boya de Bilbao.....	372
Figura 8.12. Espectro medio 3-díario correspondiente al TT número 83 (cm). Posición en la boya de Bilbao	373
Figura 8.13. $P_{high}[RSI]$ medio 3-díario en Santander, asociado a cada tipo de tiempo....	374
Figura 8.14. Espectro medio 3 díario, asociado a cada tipo de tiempo (cm). Mundaka	376
Figura 8.15. Tasa de ocurrencia de distintas clases de calidad de surf en Mundaka asociadas a cada tipo de tiempo.	377
Figura 8.16. Situación sinóptica y condiciones de surf correspondientes a la celda 5. Mundaka	378

Figura 8.17. Espectro medio 3-diario correspondiente a la situación sinóptica 5. Posición en la boya de Bilbao (izquierda) y Mundaka (derecha)379

Figura 8.18. Situación sinóptica y condiciones de surf correspondientes a la celda 62. Mundaka 380

Figura 8.19. Espectro medio 3-diario correspondiente a la situación sinóptica 5. Posición en la boya de Bilbao (izquierda) y Mundaka (derecha) 381

Figura 8.20. Probabilidad anual de las tres calidades de condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka 381

Figura 8.21. Probabilidad anual de buenas condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka 382

Figura 8.22. Probabilidad estacional de buenas condiciones de surf para cada tipo de tiempo. Mundaka.....383

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1. Arrecifes artificiales para el surf construidos hasta el momento.....	5
Tabla 1.2. Factores que conforman el recurso surf e impactos potenciales. Fuente: Lazarow <i>et al.</i> (2007).	6

Capítulo 2

Tabla 2.1. Ángulo de rotura en función de la altura de ola significativa y el nivel de destreza del surfista (Hutt <i>et al.</i> , 2001).	29
Tabla 2.2. Rangos de <i>Ir</i> según tipo de rotura.	35
Tabla 2.3. Velocidades medias de remada en m/s para diferentes modalidades de surf (Henriquez <i>et al</i> 2005).....	38
Tabla 2.4. Índices climáticos más importantes. Fuente: www.cpc.ncep.noaa.gov	81
Tabla 2.5. Trabajos científicos dedicados al análisis del clima marítimo.	81

Capítulo 4

Tabla 4.1. Esquema de las bases de datos utilizadas y apartado en el que se describen .	111
Tabla 4.2. Información sobre las distintas misiones satelitales disponibles.	114

Capítulo 5

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.....	135
Tabla 5.2. Escala para la evaluación de H_s en la escala global.	138
Tabla 5.3. Escala para la evaluación de H_s en la escala regional.	140
Tabla 5.4. Escala para la evaluación de T_p	142
Tabla 5.5. Escala de evaluación de $[SST+ST]/2$	155
Tabla 5.6. Esquema para la evaluación de las condiciones de surf a las tres escalas planteadas.	169

Capítulo 6

Tabla 6.1. Subíndices que conforman el GSI y bases de datos utilizadas.	189
Tabla 6.1. Estadísticos de la comparación de las consistencias calculadas con datos instrumentales y modelados.....	205
Tabla 6.2. Calendario oficial de pruebas del circuito ASP World Tour 2010. Fuente: www.asp.com	210

Capítulo 7

Tabla 7.1. Correlación lineal obtenida entre diferentes PCs e índices climáticos.	339
Tabla 7.2. Correlación lineal obtenida entre diferentes variables espectrales y PCs e índices climáticos. Tendencias en el largo plazo (β_{LT}).....	341

Capítulo 8

Tabla 8.1 . Tasa de ocurrencia de condiciones de surf de alta calidad, $P_{high}[RSI]$ por estaciones. Mundaka.....	383
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Celeridad de onda
d	Distancia entre grupos
d_{ij}	Disimilitud entre el dato i y los j elementos del subconjunto R
$d_{\text{subconjunto}}$	Disimilitud entre el dato i y el subconjunto R .
D	Duración del día
ε	Anchura espectral, Cartwright y Longuet-Higgins (1956)
F	Flujo de energía
f	Frecuencia
GSI	Global Surf Index
γ	Anchura espectral del espectro JONSWAP
h	Profundidad
H_{m0}	Altura de ola del momento de orden cero
H_s	Altura de ola significativa
$H_{s,\text{sat}}$	Altura de ola significativa procedente de satélites

H_{sboya}	Altura de ola significativa procedente de boyas
H_{sGOW}	Altura de ola significativa procedente del modelo GOW
I_r	Número de Iribarren
I_c	<i>Comfort Index</i>
I_{cs}	<i>Coastal Swell Index</i>
I_{Day}	Índice para evaluar el efecto de la duración del día
I_e	<i>Effective Index</i>
I_{Hs}	Índice para evaluar la altura de ola significativa
I_{Tide}	Índice para evaluar el efecto de la marea astronómica
I_{Tp}	Índice para evaluar el efecto del periodo de pico
k	Número de onda
κ	Anchura espectral definida por Rice, (1945)
η	Nivel del mar
η_{rms}	Desplazamiento cuadrático medio de la superficie libre
m_n	Momento de orden n
λ	Longitud de onda
P_{high}	Probabilidad de condiciones de surf de calidad alta
P_{low}	Probabilidad de condiciones de surf de mala calidad (no surfeable)
P_{medium}	Probabilidad de condiciones de surf de calidad media
RSI	Regional Surf Index
$S(\omega, \theta)$	Espectro direccional de oleaje

SST	Temperatura de la superficie del mar
ST	Temperatura superficial de la atmósfera
σ	Dispersión direccional, Kuik <i>et al.</i> (1988)
T_m	Periodo medio espectral
T_p	Periodo de pico
θ_m	Dirección media
θ_p	Dirección de pico
ν	Anchura espectral, Longuet-Higgins (1975)
W	Velocidad del viento
ω	Frecuencia angular
$\ \ $	Norma euclidiana
-	Símbolo para designar la media de una variable

LISTA DE ACRÓNIMOS

AMS	<i>American Meteorological Society</i>
AO	Oscilación del Ártico (<i>Arctic Oscillation</i>)
BMVE	Bajamar máxima viva equinoccial
BDOC	<i>British Oceanographic Data Centre</i>
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
DMI	Oscilación Dipolar del Índico (<i>Dipole Indian Mode</i>)
EA	Oscilación del Atlántico Este (<i>East Atlantic Oscillation</i>)
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENSO	El Niño Oscilación del Sur (<i>El Niño Southern Oscillation</i>)
EP/NP	Oscilación del Pacífico Noreste (<i>East Pacific/North Pacific Oscillation</i>)
EOFs	Función empírica ortogonal
ERA-40	Reanálisis atmosférico desarrollado por el ECMWF
FFT	Trasformada rápida de Fourier
GFO	Satelite (<i>Geosat Follow On</i>)

GEBCO	<i>General Bathymetric Chart of the Oceans</i>
GISS	<i>Goddard Institute for Space Studies</i>
GOW	<i>Global Ocean Wave (IH Cantabria)</i>
HadCRUT3.	Modelo atmosférico (CRU)
ICOADS	<i>International Comprehensive Ocean- Atmosphere Data Set</i>
IH Cantabria	Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
IOD	Oscilación del Índico (<i>Indian Ocean Dipole</i>)
JMA	<i>Japan Meteorological Agency</i>
JRA-25	Reanálisis atmosférico (JMA)
JTWC/US	<i>Navy Joint Typhoon Warning Center</i>
NAO	Oscilación del Atlántico Este (<i>North Atlantic Oscillation</i>)
NASA	<i>National Aeronautics and Atmospheric Administration</i>
NCEP/NCAR	<i>National Center of Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research</i>
NHC/NOA	<i>National Hurricane Center</i>
NMAT	<i>Night only marine air temperature</i>
NMM	Nivel medio del mar
NOAA	<i>National Ocean and Atmospheric Administration</i>
NLSW	<i>Non-linear Shallow Water Equations,</i>
MAT	<i>Marine air temperature</i>
MaxDiss	Método de selección de máxima disimilitud

OPPE	Organismo Público de Puertos del Estado
PCs	Componentes principales
PDO	Oscilación decadal del Pacífico (<i>Pacific Decadal Oscillation</i>)
PNA	Patrón de Norte América-Pacífico (<i>Pacific North American Pattern</i>)
PMVE	Pleamar máxima viva equinoccial
RA	Altímetro Radar
RBF	Funciones de base radial
REDEXT	Red exterior de boyas (OPPE)
REDCOS	Red de boyas costeras (OPPE)
REDMAR	Red de mareógrafos (OPPE)
RMS	Error cuadrático medio
SO	Oscilación del Sur (<i>Southern Oscillation</i>)
SAM	Oscilación del Antártico (<i>Southern Annular Mode</i>)
SCA	Patrón de Escandinavia (<i>Scandinavian Pattern</i>)
SI	Índice de dispersión
SWAN	Modelo de propagación de oleaje (<i>Simulating WAves Nearshore</i>) TUDelft
TPOX7	Modelo global de marea astronómica
TT	Tipos de tiempo
WAM	Modelo de generación de oleaje (<i>Wave Model</i>)
WMO	Organización Mundial de
WP	Índice del Pacífico Oeste (<i>Western Pattern</i>)
WW III	Modelo de generación de oleaje (<i>Wave Watch III</i>)

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

“...Un surfista observa desde su coche las olas solitarias rompiendo en la playa a la cual va desde que era niño. Este día las olas presentan una forma, un color, una textura que las hace diferentes del resto de los días. Posiblemente sea el viento terral típico del otoño el que hace que las olas sean tan perfectas, o quizás sea la profunda borrasca situada a miles de kilómetros de donde él se encuentra la responsable de tanta belleza. Las líneas, paralelas, rectas, se aproximan hacia la costa, rompiendo una tras otra sobre un banco de arena que se ha formado durante el verano. Todas lo hacen de la misma manera, con más potencia a medida que la marea llega a su punto más bajo. El surfista inquieto, experimentando la satisfacción del que lleva toda su vida buscando un tesoro y por fin lo ha encontrado, se imagina remando hacia el pico por el canal existente que le conduce desde la orilla al lugar exacto donde las olas comienzan a romper, se imagina a si mismo remando con todas sus fuerzas para lograr coger la ola, el momento del take -off en el que se encuentra por primera vez con el labio cristalino que lo envuelve, la sensación de velocidad, de potencia. Calcula que, tal y como están las condiciones, es posible permanecer en el tubo más de 10 segundos, más de 100 m de pared para jugar con la energía del océano.

El surfista, decidido, sale del coche y experimenta el frío típico de las mañanas otoñales, pero tanta perfección lo hace insensible, para eso tiene un traje de 4 milímetros que le permite permanecer más de dos horas en el agua en esta época del año. Las olas son aproximadamente de 2 metros, huecas, rápidas. El surfista, enfundado en el traje, elige su tabla más grande, una 6 pies y 8 pulgadas, perfecta para este tipo de condiciones y corre hacia la orilla deteniéndose justo en la línea que separa la tierra firme del azul océano. En este punto, contempla por última vez las olas vacías, inalteradas por su presencia; se siente afortunado. Tanta belleza es el fruto de la combinación de muchos procesos, de los cuales él por primera vez es consciente.

Solo un surfista sabe que es lo que se siente. No es fácil encontrar olas así todos los días, y este último año ha sido desastroso en lo que a la calidad de las olas se refiere. La mayoría de los días del año pasado o las olas eran demasiado pequeñas, o venían demasiado ceñidas, o el viento onshore revolvió el mar haciendo que las olas fueran mediocres, cortas, irregulares; en definitiva, de muy mala calidad. Los surfistas más veteranos dicen que hay años mejores que otros, que existen ciclos, que ciertos inviernos destacan sobre otros por la constancia y calidad de las olas, los vientos, la temperatura, los fondos de las

playas. El surfista ha escuchado que este año está ocurriendo el fenómeno de El Niño: graves inundaciones en las costas del Pacífico, centenares de afectados en Chile y Perú, grandes pérdidas en la industria pesquera, y se pregunta pregunta si esto tendrá algo que ver con las olas que él suele surfear en su playa del Atlántico Norte...”

Esta breve historia trata de introducir al lector en la experiencia del surf, no solo en su sentido más metafísico, sino que trata de poner de manifiesto la enorme cantidad de factores que intervienen en la generación de olas surfeables y, por tanto, la complejidad del problema al que se enfrenta esta tesis.

Este trabajo está dedicado a evaluar las condiciones de surf, entendiendo que la ocurrencia de las mismas es parte fundamental en la disponibilidad de un recurso natural singular, rentable económicamente y sostenible medioambientalmente.

El capítulo 1 se ha estructurado en 5 apartados. En el apartado 1.2 se justifica la necesidad de caracterizar el recurso surf, aportando datos relevantes en cuanto a la importancia de esta actividad en la sociedad actual. En el apartado 1.3 se hace una breve mención a la historia del surf. En el apartado 1.4 se definen conceptos importantes que introducen al lector en la experiencia del surf, definiendo qué es una ola “surfeable”, qué se entiende por una buena sesión de surf, y qué tipos de rompientes existen. En el apartado 1.5 se plantea el problema a tratar en esta tesis, las escalas espacio-temporales de interés así como los principales procesos físicos a resolver.

1.2. Motivación

Es típico de sociedades desarrolladas poseer un sector terciario potente y dinámico que proporciona servicios a las necesidades de la población. Cada día es más clara la importancia de las actividades de ocio y disfrute en la calidad de vida de los ciudadanos, por lo que el ocio como sector económico es un objetivo prioritario tanto en políticas estatales como locales. El turismo, dentro del sector servicios, se presenta hoy en día, además de cómo una actividad muy lucrativa, como pilar fundamental en la economía de muchos países.

Los valores y costumbres de los ciudadanos han cambiado en la última década hacia una vertiente más concienciada con el medio natural. Parte de este cambio en el comportamiento social se debe, por un lado, al aumento del conocimiento sobre el medio ambiente y el efecto que nuestros hábitos tienen en él. Y por otro, a la práctica de actividades deportivas y de ocio en el entorno natural que ayudan al individuo a conocerlo y valorarlo. Además, el aumento del nivel adquisitivo en las sociedades avanzadas, junto con el desarrollo de los medios de transporte posibilita a muchos ciudadanos desplazarse a lugares remotos del planeta, turismo éste, que ha evolucionado desde una vertiente clásica, estática y contemplativa a una vertiente más activa donde el turista está interesado en realizar cierto tipo de actividades en el lugar de destino.

Hoy en día, el surf se presenta como una de las actividades englobadas dentro del marco del turismo, más lucrativas y productivas, no solo por la industria textil y de material deportivo que lleva asociada, sino por la capacidad de atracción que ejerce ante ciertos grupos sociales con alto nivel adquisitivo. Así, existen destinos turísticos a los que todo el mundo relaciona con el surf como por ejemplo Hawai, California o Tahití.

En el presente, el surf ha llegado a gozar de cierta relevancia económica, social y cultural. Se calcula que aproximadamente de 10 a 17 millones de personas en el mundo practican surf habitualmente (Buckley, 2002a). De las cuales, se estima que 2.5 millones lo hacen en Australia, 3.5 en Estados Unidos, 2 millones en Japón, 2.5 millones en Sudamérica y 1.5 millones en Europa (Atkins, 1997; Lazarow *et al.*, 2007). Buckley (2002a), calculó una tasa de crecimiento anual de la actividad que ronda el 12-16%.

La imagen arquetípica de surfista, joven, desempleado y al margen de la sociedad, ha cambiado mucho desde los 60s. Estudios demográficos realizados en California (Nelsen *et al.*, 2007), revelan que el perfil medio del surfista, es el de una persona con una edad media de 30-35 años, con buen nivel cultural, y con ingresos por encima de la media del usuario de las playas donde fueron realizadas las encuestas. Estudios similares demuestran un comportamiento poblacional similar en playas europeas del Reino Unido y España (Arup, 2001).

Aunque existe una falta generalizada de información acerca del valor socio-económico del surf o del turismo del surf, la información disponible indica, que éste, ejerce un peso muy importante en el sector turístico a escala internacional, nacional, regional y local, siempre que se den las condiciones necesarias para la ocurrencia de olas “*surfeables*”. Por ejemplo, a escala nacional, Lazarow *et al.* (2007), encontraron que más de 100.000 surfistas visitaron Costa Rica en la primera mitad de 2006. Calcularon que el surf contribuía anualmente con alrededor de 200 millones de dólares, aportando más de un 25% al producto interior bruto del país. A escala local, los estudios de Nelsen (2007), estimaron que el surf en San Clemente (California), producía entre 8-13 M\$/año, mientras Murphy y Bernal (2008), a través de un estudio socioeconómico en la localidad vizcaína de Mundaka, estimaron que el surf aportaba anualmente más de 4.5 M\$/año, generando alrededor de 100 empleos en una población aproximada de 2.000 habitantes.

En el ámbito de la ingeniería y planificación costera, el surf ha ido ganando cierta relevancia, debido en parte a la necesidad de compatibilizar los usos y actuaciones tradicionales con los requisitos de este nuevo sector en auge. Son cada día más frecuentes las publicaciones científicas relacionadas con el tema, unas de carácter socioeconómico tratando de identificar los beneficios que el surf lleva consigo, y otras que intentan esclarecer la física de los procesos involucrados en el mismo. En el mundo, se han construido desde los años 90, más de siete arrecifes artificiales para el surf (ver tabla 1.1), y se han llevado a cabo gran número de actuaciones costeras encaminadas a conservar y mejorar el recurso surf (ej. Superbank en Australia o Mundaka en España). El éxito de las actuaciones enfocadas a mejorar el recurso surf es, a día de hoy, del todo cuestionable, en parte por la falta de tecnología y en parte por falta de conocimiento.

Nombre	Localización	Estado	Propósito
Cables Reef	Western Australia	Completo 1999	Surf
Narrowneck Reef	Gold Coast, Australia	Completo 2000	Surf/protección
Pratte's Reef	California	Completo 2001	Surf
Mount Reef	Maunganui N.Zelanda	Incompleto	Surf
Opunake Reef	Opunake,N.Zelanda	Incompleto	Surf
Boscome Reef	Bournemoth England	Completo 2010	Surf
Kovalam Reef	Kerala, India	Completo 2010	Surf

Tabla 1.1. Arrecifes artificiales para el surf construidos hasta el momento.

Dado que el recurso surf está ligado a unas características singulares del oleaje y a unas condiciones geomorfológicas concretas, es lógico que no todas las costas sean idóneas para la práctica de este deporte. Debido al carácter singular y único de las rompientes con cierta calidad, en países como Estados Unidos o Australia existe la figura legal de *reserva nacional de surf*. Mediante esta figura se pretende conservar estos elementos, y protegerlos ante otras iniciativas de actuación costera. Al mismo tiempo, las comunidades locales disponen de la posibilidad de explotar un recurso de una forma sostenible en el largo plazo. Cabe mencionar las reservas australianas de “*Lennox National Surfing Reserve*” ó “*The Bells Beach Surfing Recreation Reserve*” declaradas en 1989 y 1973 respectivamente.

El concepto de recurso surf ó “*surfing capital*” fue introducido en la literatura por Lanangan (2002). Este concepto considera un amplio abanico de factores que pueden intervenir de cierta manera en la experiencia del surf, como: la calidad y la frecuencia de las olas, aspectos ambientales como la calidad de las aguas, accesibilidad, belleza paisajística o equipamientos públicos, entre otros. El disponer de mejores o peores condiciones de surf que las localidades colindantes, supone, para una población costera, una oportunidad de negocio muy atractiva. Por tanto, una estimación de la tasa de ocurrencia de eventos surfeables es necesaria en este ámbito. Al mismo tiempo, si una rompiente resulta alterada por la acción del hombre, el conocer la operatividad de la misma es fundamental para establecer medidas compensatorias, o evaluar de alguna forma la pérdida causada. En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los principales aspectos de los que depende el recurso surf y los posibles impactos naturales o antrópicos que pueden afectar a los mismos.

Factores	Descripción	Impactos de carácter natural o antrópico
Calidad de las olas	Forma característica de la rotura de las olas en un lugar determinado	Estructuras de protección costera, diques, encauzamiento de desembocaduras, arrecifes artificiales. Movimientos de arena, dragados, rellenos.
Frecuencia de las olas	Frecuencia de marejadas que producen olas surfeables.	Cambio climático, variación en la intensidad y frecuencia de las marejadas, elevación del nivel del mar.
Factores ambientales	Condiciones ambientales que pueden afectar a la integridad física de los usuarios	Peligrosidad inherente de la propia rompiente. Calidad de las aguas. Presencia de organismos marinos que supongan cierta peligrosidad, tiburones, medusas etc.
Factores sociales	Aspectos sociales que rodean la experiencia del surf	Legislación, pudiendo restringir el acceso al agua. Aceptación social de la actividad. Estrategias de señalización y educación en los usos costeros. Localismo, agresiones, intimidación.

Tabla 1.2. Factores que conforman el recurso surf e impactos potenciales. Fuente: Lazarow *et al.* (2007).

Donicar y Fluker (2002) definieron el turismo del surf como: “*el acto de viajar a lugares cercanos por periodos de tiempo que no excedan los 6 meses, o a destinos internacionales por periodos de tiempo que no excedan los 12 meses, con una participación activa en el deporte del surf, donde la ocurrencia de olas surfeables, de buena calidad, es la principal motivación a la hora de elegir el destino*”. Arup (2001), a través de encuestas a la comunidad surfista, encontró que la ocurrencia de condiciones surfeables es el factor más valorado por la mayoría de los encuestados (>60%).

Hoy día, existe una alta demanda de información acerca de la ocurrencia de eventos de oleaje para el surf en todo el mundo. Los surfistas de cualquier rincón del planeta consultan constantemente páginas de previsión de oleaje en el corto plazo (1-7 días). Webs como www.windguru.com, reciben diariamente más de 100.000 visitas, fundamentalmente de usuarios europeos. El surfista medio, demanda cada día información más detallada de lo que acontece en su *spot* cercano (*one day surf destination*), en el destino de fin de semana (*regional surf destination*), o de vacaciones (*worldwide surf*

destination). Esta información, no solo es solicitada en el corto plazo, si no que se comienza a demandar el conocido como *seasonal outlook* o previsión estacional. Revistas internacionalmente conocidas como la californiana *Surflife*, predicen, basándose en previsiones estacionales de índices climáticos como El Niño o la NAO, como serán las condiciones de surf en las costas del Pacífico o del Atlántico Norte.

El comportamiento del oleaje en los océanos del planeta es bien conocido. En este sentido, existe un gran número de trabajos científicos que caracterizan el régimen medio o extremal del oleaje en distintas escalas espaciales y temporales. Estos estudios se basan en datos de oleaje de boyas, rutas de barcos, satélites y modelos numéricos, a partir de los cuales, se obtienen relaciones probabilísticas entre los diferentes parámetros que describen el oleaje y el viento y los patrones de variabilidad climática. Sin embargo, no existen metodologías científicas contrastadas que evalúen la idoneidad del oleaje para la práctica del surf a las escalas espacio-temporales planteadas, que cuantifiquen la frecuencia de ocurrencia de episodios de oleaje surfeable y el tiempo durante el cual éstos se producen, lo cual es fundamental para múltiples intereses.

1.3. Reseña histórica

El surf nació en un pasado remoto y olvidado. Nadie sabe con certeza dónde o cómo. Lo cierto es que los primeros pueblos que se lanzaron al océano percibieron rápidamente la capacidad de las olas para impulsar u oponerse a sus embarcaciones. Se cree que estos pueblos habitaron en las costas de África Occidental y Perú donde todavía hoy las olas del mar se reconocen como algo sagrado.

Existen multitud de pruebas de que el surf ya se practicaba por todo el Pacífico Sur mucho antes de que esos pueblos entraran en contacto con los europeos. Pero era en Hawai donde el surf tenía mayor significación cultural, quizás debido a la gran cantidad y calidad de sus olas. Las islas de Hawai están situadas justo en el centro de la mayor superficie de agua del planeta, lo cual las deja expuestas al oleaje procedente de todas las direcciones. Puede decirse que las islas que componen este archipiélago fueron creadas para el surf.

Fue un 18 de Enero del año 1778 cuando el Capitán James Cook a bordo del *Resolution* arribó al archipiélago hawaiano mientras esperaban la llegada del verano para intentar descubrir el paso del noroeste, por el estrecho de Bering. En los grabados que testifican este descubrimiento ya aparecían isleños con sus tablas.



Figura 1.1. Bienvenida a Cook en Kealakeke Bay. Fuente: <http://www.llstudents.org>.

En 1896 Thomas G. Thrum escribió “...cabalgar sobre las olas era uno de los deportes Hawaianos preferidos...”. Deslizarse sobre las olas era algo que fascinaba en particular a la realeza; éstos se reservaban las mejores rompientes para su disfrute. La fabricación de tablas revelaba una conciencia espiritual, un gran conocimiento de la mecánica de las olas y un auténtico deseo de disfrutar del surf. Algunas de estas tablas aún se conservan en el Museo Episcopal de Honolulu.

Con el cambio de siglo las islas Hawai pasaron a formar parte del territorio estadounidense. Las poblaciones indígenas habían descendido en número, quedando relegados en su mayoría en la isla de Oahu, donde los escasos surfistas que habían sobrevivido se congregaban en varios puntos de la playa de Waikiki. Los primeros turistas que visitaban estas islas quedaban maravillados al ver, como los surfistas hawaianos, eran capaces de caminar sobre el agua. Hacerse una fotografía con una tabla de surf se convirtió en la señal de su estancia en las islas.

Nacido en 1890, Duke Hahanamoku fue el precursor del surf moderno, al conseguir en 1912 la medalla de oro en los cien metros libres de los Juegos Olímpicos de Estocolmo,

Suecia. Gracias a su éxito deportivo, Duke descubrió el surf a las masas realizando exhibiciones de sus habilidades por las costas de Estados Unidos y Australia.

En los años 40, las playas de San Onofre y Malibu en California eran frecuentadas por multitud de surfistas que venían en busca de su idilio particular con el sol y las olas. La popularización del automóvil contribuyó en gran medida al auge de este fenómeno, pero al estallar la Segunda Guerra Mundial, todo quedó paralizado. Tras este lapsus de seis años, y gracias a la aparición de nuevos materiales como la fibra de vidrio y el neopreno, el estreno de películas como *Gidget*, *The Endless Summer*, *Big Wednesday* etc. la cultura del surf experimentó un boom definitivo, llegando a todos los rincones del planeta.

Ya en los años 70, el surf llevaba vinculado una actividad económica que reportaba anualmente grandes beneficios. El éxito creciente de la industria textil, cuyo marketing va asociada a la imagen de este deporte, incidió en todos los aspectos del surf hasta llegar a su profesionalización. El Circuito Mundial de Surf nace en 1976, mediante el reconocimiento de los principales campeonatos del mundo como Santa Cruz en California o Pipeline en Hawái. Estos campeonatos serían considerados como pruebas del circuito que puntuarían para un resultado final, con premios en metálico que llegaban a los 140.000\$. Sin embargo, no fue hasta 1982, cuando se creó la ASP, *Association of Surfing Professionals*, que es el organismo que hoy día dirige el circuito mundial.

A medida que las playas más famosas de Estados Unidos se iban llenando de gente, comenzó a surgir un fenómeno denominado *surfari*, o la búsqueda de rompientes inexploradas, aún por descubrir. Este fenómeno se convirtió en la esencia de la experiencia del surf. Las revistas especializadas empezaron a dedicar una parte cada vez mayor de su espacio editorial a esos viajes. Centro América, Indonesia, África Occidental, Marruecos, España, Francia, Irlanda, México o Fiji se convirtieron en los destinos más reclamados. Este fenómeno supuso una oportunidad única para el desarrollo socioeconómico de ciertos enclaves: Kuta en Bali, Hossegor en Francia, Mundaka en España o Ericeira en Portugal son lugares donde no se entiende la vida sin el surf; donde el volumen de negocio directamente relacionado con este deporte supone una parte importante de la economía local. El contacto directo con la naturaleza, la práctica de un deporte que requiere unas condiciones climáticas, oceanográficas y

geomorfológicas específicas, hacen preciso un profundo conocimiento del ambiente en el que se desarrolla esta actividad. Así mismo, una buena rompiente es considerada como un recurso natural de gran valor, que reporta beneficios, no solo económicos, a la comunidad local.

Son muchas las rompientes que han sido alteradas o destruidas en nombre del progreso, algunas con gran valor natural, social e incluso histórico. Cabe mencionar el caso Dana Point en California del Sur, que un 29 de Agosto de 1966 fue cerrada a cualquier actividad acuática por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos para la creación de un puerto deportivo. Este mítico enclave, fue una de las mejores rompientes que se conoció entre 1930 y 1960, por lo que su destrucción fue la semilla de un movimiento social con bases conservacionistas y proteccionistas, cuyo poder ha ido creciendo a lo largo de los años.

Destacan las organizaciones “*Surfrider Foundation*” y “*Save the Waves*” que desde 1984 llevan desarrollando actividades encaminadas a: conservación de los ambientes litorales, mejora de la calidad de las aguas de baño, educación y sensibilización ambiental etc. La “*Surfrider Foundation*” cuenta con mas de 50.000 socios en todo el mundo, formando una red mundial con sedes en Estados Unidos, Europa, Japón, Australia y América del Sur. “*Surfrider Foundation Europe*” con sede en Biarritz (Francia) cuenta actualmente con más de 15.000 socios. Estas organizaciones, junto a otras de carácter local, juegan cada día un papel más importante en la planificación costera, con políticas conservacionistas propias, respaldo legal y una sólida financiación.

1.4. Fundamentos del surf

El surf, como cualquier otro deporte, tiene lugar en un entorno determinado (cancha, circuito, etc.). La zona de surf, espacio comprendido entre la línea de rotura del oleaje y el contorno de tierra, es el lugar donde se practica este deporte. Las razones que explican el porqué oleajes de una determinada altura, periodo o dirección, son más adecuados que otros, no son siempre evidentes. Por este motivo, es necesario introducir una serie de conceptos básicos que permitan entender la actividad que aquí se trata, como: qué es una ola surfeable o qué tipos de olas surfeables existen.

Con el fin de facilitar el entendimiento del resto de capítulos presentados en esta tesis, el objetivo de este apartado es introducir al lector en la experiencia del surf.

Definición y modalidades de surf

El Diccionario de la Real Academia Española define el surf como: “*El surf es un deporte náutico consistente en mantenerse en equilibrio encima de una tabla especial que se desplaza sobre la cresta de las olas*”.

Wikipedia define el surf como: “*El surf es un deporte que consiste en deslizarse sobre las olas del mar de pie sobre una tabla, dirigiéndola gracias a una o varias quillas situadas en la parte trasera de la tabla.*”

En realidad el surf, en su significado más amplio, es el acto de deslizarse por la superficie de una ola en rotura. Éste presenta diferentes modalidades, entre ellas las más comunes son:

- *Body surfing*: Consiste en deslizarse por la pared de la ola en rotura sin la ayuda de ningún tipo de tabla que aumente la flotabilidad.
- *Bodyboard*: Consiste en deslizarse sobre la pared de la ola en rotura tumbado sobre una tabla de pequeñas dimensiones. El surfista, generalmente, se sirve de unas aletas de caucho para aumentar su velocidad de remada; éstas, a su vez, sirven de timón una vez el surfista ha cogido la ola, pudiendo controlar así la dirección de avance.
- *Kneeboard*: Consiste en deslizarse sobre la pared de una ola en rotura de rodillas sobre una tabla de mayores dimensiones que las de *body board*. En esta modalidad el deportista también se sirve de unas aletas para aumentar la velocidad de remada; sin embargo, la tabla dispone de una o más quillas que permiten dirigir la trayectoria.

- **Kayak surf:** Consiste en deslizarse sobre la pared de una ola en rotura sentado sobre una embarcación de pequeñas dimensiones utilizando los remos para aumentar la velocidad y dirigir a la misma.

- **Board surf:** Consiste en deslizarse sobre la pared de una ola en rotura de pie sobre una tabla, con o sin quillas. Esta es la modalidad más ampliamente practicada, existiendo dos categorías principales dentro de la misma:
 - o **Shortboard:** Las dimensiones de la tabla empleada no suelen superar los 8 pies de longitud (≈ 2.5 metros). Sus escasas dimensiones permiten alcanzar una gran velocidad sobre la pared de la ola y realizar gran cantidad de maniobras. Suele emplearse cuando las olas son peraltadas (rotura en voluta) y exigen un nivel de destreza elevado.

 - o **Longboard:** Las dimensiones de la tabla superan los 8 pies de longitud, siendo su volumen mucho mayor que el de la tabla corta, lo cual limita la maniobrabilidad de la misma. Esta modalidad suele ser practicada cuando las olas son pequeñas o poco peraltadas (rotura en descrestamiento) ya que poseen una gran flotabilidad. También son muy empleadas en las fases de aprendizaje debido a su alta estabilidad.

Definición y características de las olas para el surf

Las olas, al entrar en aguas someras, cambian de dirección, disminuyen su longitud de onda y aumentan en altura. Justo antes de llegar a la zona de surf (donde ocurre la rotura), la forma de las ondas cambia, pasando de presentar una forma cuasi-simétrica a adquirir la típica forma de las olas peraltadas antes de romper. Ésta es la zona donde los surfistas se sitúan para coger las olas, el *line up*. La rápida transformación del frente de ola hace que el surfista disponga de una pequeña porción de tiempo para ponerse de pie en la tabla, el *take off*. Si el surfista rema una ola demasiado pronto, sin que ésta se encuentre lo suficientemente peraltada, la cresta de la ola simplemente pasará por debajo de éste. Si por el contrario el surfista rema la ola demasiado tarde, éste se encontrará en el borde de una pared vertical a punto de desmoronarse, por lo que la

consecuente caída, *wipe out*, es casi inevitable. Si el surfista consigue remar la ola en el momento justo, descenderá de la parte superior de la cresta hasta el nivel donde alcance la mayor estabilidad y/o velocidad habiendo realizado con éxito la bajada, *the drop*.

Toda ola que permita al surfista avanzar por la pared peraltada (en rotura) durante un tiempo mínimo, es considerada surfeable. Así, aquellas olas cuyos frentes inciden paralelos a la costa y rompen simultáneamente a lo largo de todo el frente no son aptas para la práctica de este deporte. Por tanto, para que una ola sea surfeable, su frente ha de romper progresivamente hacia uno u otro lado del punto de inicio de rotura. Durante este proceso, la ola ha de mantener un peralte mínimo que permita al deportista disponer de la energía potencial y cinética necesaria para mantener la velocidad a la que el frente rompe lateralmente.

¿Qué se entiende por una buena sesión de surf?

Walker (1974a) identificó los parámetros que más afectan a la experiencia del surf en una rompiente dada. Estos incluían: la altura de ola, la velocidad de rotura, *wave peel velocity*, el tipo de rotura, el periodo del oleaje, la textura de la superficie del agua en la zona de rompiente (el viento, las corrientes de retorno, las olas reflejadas), la cantidad de usuarios, la accesibilidad, la temperatura (del aire y del agua) y los peligros potenciales (vida marina, fondos rocosos o coralinos someros).

Aunque es importante reconocer que la calidad de la sesión de surf está abierta a la interpretación subjetiva de cada surfista, a principios de los años 60, Midget Ferrally (1965) describió su idea sobre la perfecta sesión de surf: “... *surfear olas tan grandes, con una pared tan larga, con la superficie del agua tan suave, olas tan huecas y limpias como sea posible, y tan rápidas como yo sea capaz de surfear. Esto podría ser la perfección*”. Esta idea permanece hoy día en la mente de la mayoría de los surfistas, aunque dependiendo de la modalidad de surf practicada y del nivel de habilidad adquirido la idea de surfear olas tan grandes como sea posible no es del todo cierta. De hecho muchos de los surfistas no entrarían en el agua si las olas fuesen demasiado grandes, a pesar de que estas rompan ordenadas, largas y con una pared ideal para el surf.

Partes de una ola

En la práctica, se diferencia entre rompientes de derechas o de izquierdas, haciendo referencia a la dirección que el deportista debe tomar para realizar el recorrido más largo. Una vez la ola comienza a romper, se pueden apreciar tres partes diferentes con base en el peralte que alcanza la pared de la ola mientras se produce la rotura (ver figura 1.2).

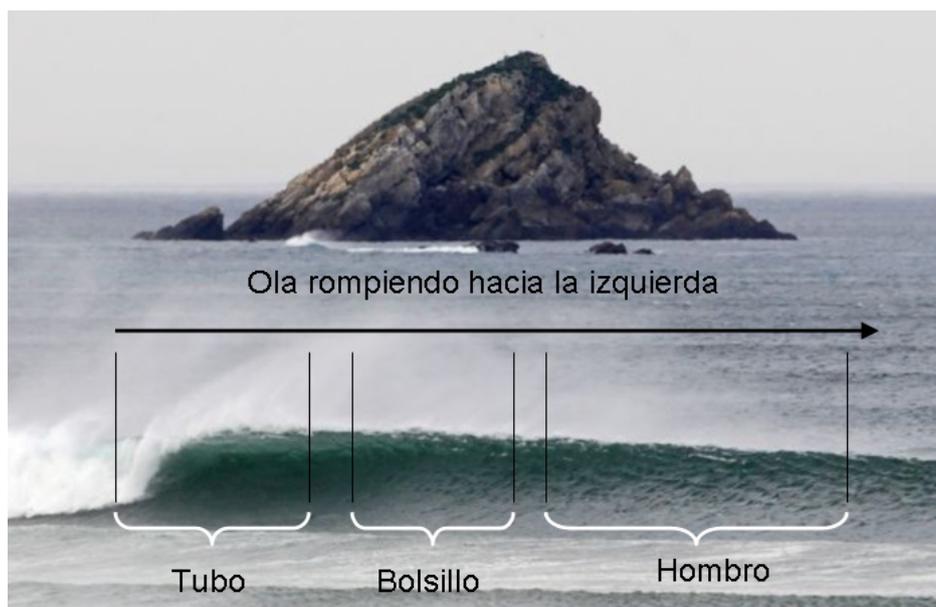


Figura 1.2. Partes de una ola. Izquierda de la Ría, Liencres (Cantabria). Fuente: www.surfcantabria.com

En la figura 1.2 se muestran las tres partes características de una ola surfeable, éstas son:

- El tubo, *the tube*: No está presente en todos los tipos de olas surfeables, las olas cuya rotura se produce en descrestamiento no son capaces de generar este vórtice. En esta sección, el labio de la ola cae sobre la base de la misma dejando un hueco suficiente para que el agua que cae no interfiera con el surfista. Permanecer en el interior del tubo el mayor tiempo posible es la maniobra reina en el surf, ya que entraña un alto grado de dificultad.
- El bolsillo, *the pocket*: Es donde se realizan la mayoría de las maniobras en el surf. Esta parte de la ola muestra un peralte próximo a los 90°, lo cual permite al surfista avanzar y/o retroceder por el frente de la ola, al mismo tiempo permite

ganar velocidad subiendo hacia arriba (energía potencial) y volviendo a bajar (energía cinética). Esta sección está presente en todo tipo de olas surfeables.

- El hombro o el codo, *the shoulder*: Es donde el peralte de la ola pasa de 90° a un mínimo alrededor de los 45°, lugar en el cual la pendiente de la ola es demasiado suave para generar velocidad.

La rompiente de surf, *the surf spot*, la zona de surf

El surf tiene lugar en una rompiente o *surf spot* (Walker, 1971). Pueden existir rompientes reconocidas en playas, cabos, desembocaduras y arrecifes de todo tipo (coral, granito, arenisca etc.). Cada rompiente es única, pudiendo unas producir mejores olas que otras.

Las siguientes rompientes son reconocidas a nivel mundial, y pueden ser indicativas de los estándares que ha de cumplir una ola de gran calidad o *world class*: Tavarua en Fiji, Sunset en Hawaii, Puerto Escondido en México, Jeffreys Bay en Sudáfrica o Mundaka en el País Vasco. En estas rompientes, mundialmente conocidas, el surfista puede experimentar olas de entre 1 y 5 metros, con secciones prolongadas de tubo y con una distancia surfeable superior a los 100-200m.

Además de por la calidad típica de las olas que rompen en un determinado *spot*, existen otros que son conocidos por la constancia de oleajes surfeables, puesto que estos funcionan ante un amplio espectro de alturas de ola, de periodos, direcciones y niveles de marea. Frecuentemente las rompientes de surf están orientadas de manera que el viento dominante sea de tipo terral, de tierra a mar u *offshore/sideshore*, haciendo que la superficie del agua sea suave la mayor parte del tiempo.

A un tramo de la costa en el que se concentran varias rompientes de cierta calidad, se le denomina zona de surf. Son zonas de surf, por ejemplo, la zona de Ericeira en Portugal, la zona de Tagazoute en Marruecos o la Península de Bukit en Bali. Las zonas de surf suelen presentarse giradas respecto a la dirección media de la costa a mayor escala, y

suelen caracterizarse por presentar vientos favorables durante la mayor parte del tiempo y fondos que permiten la formación de olas para el surf.

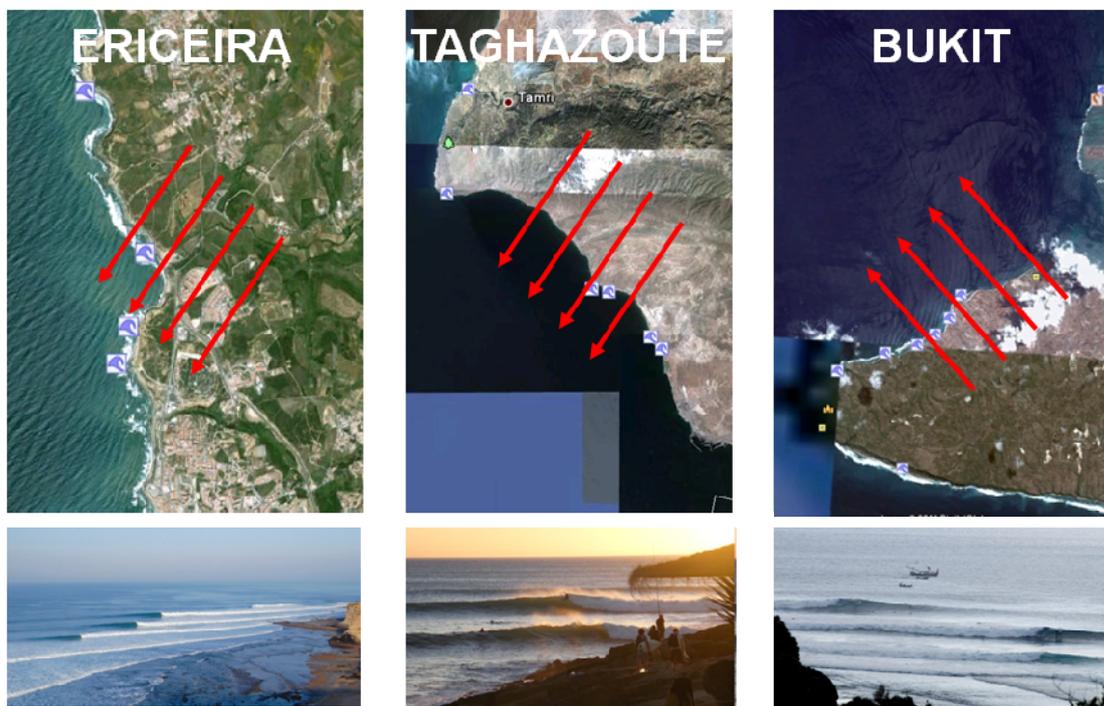


Figura 1.3. Ejemplo de zonas de surf, los vectores rojos indican la dirección del viento dominante. Fuente: Google Earth.

Tipos de rompiente

Las olas rompen en la costa en multitud de formas diferentes. Las hay que rompen de derechas, izquierdas, rápidas, lentas, pequeñas y grandes; las hay largas y cortas, con tubos profundos o que rompen suavemente permitiendo al surfista realizar varias maniobras. Hay muchas razones por las que unas olas son tan diferentes de las otras, pero, la principal razón, es la forma de la plataforma sobre la que éstas rompen. La morfología del fondo, influenciada por el material con el que está formado, es lo que en último término determina la forma en la cual las olas rompen. En este epígrafe se analizan las principales tipologías de fondos y los efectos que éstos tienen en la rotura del oleaje.

Mead *et al.* (1998) definieron cinco categorías geomorfológicas de rompientes de surf. Estas son:

- **Salientes, cabos, *headlands*, *point breaks*.** En este tipo de rompientes, las olas refractan alrededor del saliente antes de romper. La refracción actúa como filtro de las altas frecuencias permitiendo que sólo las de mayor periodo lleguen a romper, lo cual favorece la calidad del surf. La dirección de los frentes en el momento del *take off* es diferente de la dirección del oleaje en mar abierto. Ejemplos de este tipo de categoría son el Rincon en California o Kirra en Australia (figura 1.4).

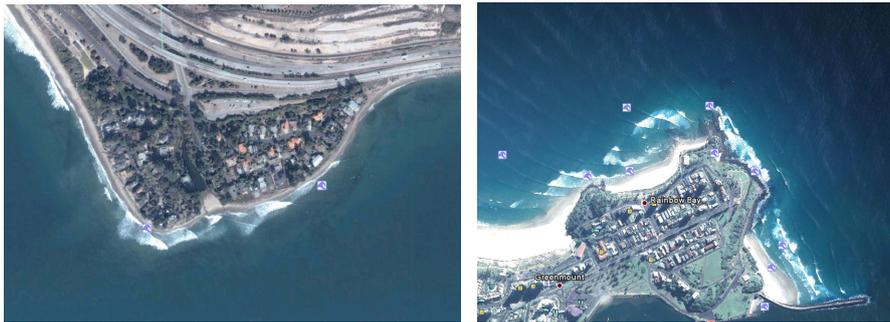


Figura 1.4. Ejemplo de rompientes de surf en salientes de tierra. Rincon, California (izquierda), Kirra, Australia (derecha). Fuente: Google Earth.

- **Playas, *beach breaks*.** Las playas son sistemas extremadamente complejos, formados por sedimentos relativamente finos, que son capaces de adoptar una infinidad de formas. La forma de las olas que rompen en una playa está determinada por la morfología de la misma, que casualmente está condicionada por las olas que sobre ella rompen y el tamaño del sedimento que la forma, Wright y Short (1984). No todas las playas son aptas para el surf, pues han de presentar bancos de arena que permitan la rotura oblicua del oleaje. Como ejemplo de rompiente de playa internacionalmente conocida se muestra en la figura 1.5 una imagen de las Landas.



Figura 1.5. Rompiente de playa en las Landas (Francia). Fuente: <http://www.surf-much.com>.

- **Arrecifes, reefs.** Éstos, al contrario que las playas, son fondos rígidos que no cambian de forma, al menos en una escala de tiempo de centenas de años. Estas plataformas pueden tener un origen muy diverso, lo cual, también influye en la forma de las olas que sobre ellas rompen. Los fondos de arrecife presentan la ventaja de generar olas casi idénticas unas de otras, siempre que las condiciones de oleaje sean apropiadas, lo que les confiere una alta calidad o idoneidad para el surf. Ejemplos de esta categoría son, Pedra Branca en Portugal o Pipeline en Hawai (figura 1.6).



Figura 1.6. Rompiente de playa arrecife, Pedra Branca (Portugal). Fuente: <http://www.globalsurfers.com>.

- **Desembocadura de ríos, river mouths.** La dinámica inducida por la marea astronómica permite en ocasiones la formación de barras arenosas muy estables en el medio y largo plazo, permitiendo la generación de olas casi idénticas siempre que las condiciones de oleaje sean apropiadas. El banco de arena exterior, el oleaje y la corriente de marea interaccionan dando lugar a olas surfeables, cuya idoneidad para el surf, depende de la energía del oleaje, la carrera de marea, el prisma de marea y la disponibilidad y transporte longitudinal de sedimento (Fitzgerald, 1996). La alteración de cualquiera de estos factores puede perjudicar drásticamente la surfeabilidad, así, muchas rompientes de este tipo como Rodiles en España, han surgido después del encauzamiento de ciertas desembocaduras, mientras que otras han sido afectadas negativamente (Scarfe *et al.*, 2003). En la figura 1.7 se muestra la famosa rompiente de Mundaka.



Figura 1.7. Rompiente de desembocadura, Mundaka (Vizcaya). Fuente: www.surf30.com

- *Ledge breaks, slabs*. Este tipo de rompiente, sin traducción al castellano, es capaz de generar las olas más grandes e intensas que es posible surfear. Son cambios abruptos en la batimetría, de forma que el oleaje cambia rápidamente de aguas muy profundas a aguas muy someras, produciendo una rotura muy violenta. La rompiente de esta categoría más conocida es la de Shipsterns en Tasmania (figura 1.8).



Figura 1.8. Slab, Shipsterns Bluff (Tasmania). Fuente: www.coastalwatch.au

1.5. Planteamiento del problema

La rotura del oleaje en forma de olas surfearables es un fenómeno, en el cual, intervienen procesos de diferente naturaleza y escala. Las condiciones medias de surf en un punto dado vendrán controladas por la configuración de la costa y el clima, con especial mención al clima marítimo. El oleaje frente a la costa viene dado por la disponibilidad de un *fetch* efectivo, en el cual, se generarán olas, siempre que soplen vientos suficientemente intensos. Los vientos en superficie pueden ser clasificados en vientos

anticiclónicos, ciclónicos o térmicos, cada uno con un efecto propio en el oleaje. La ocurrencia de los mismos, su duración e intensidad, dependen a su vez de situaciones atmosféricas de mayor escala. Esta variabilidad atmosférica modula, en escalas temporales de días, meses, años y lustros, la severidad y ocurrencia del oleaje. En este sentido, entender el funcionamiento del clima, cómo la atmósfera intercambia energía con el océano, cómo la transporta, y cómo esto afecta a las borrascas y anticiclones, es fundamental para entender la disponibilidad de condiciones de surf. Otros factores como la temperatura del agua o del aire, son también relevantes en la experiencia del surf.

Desde la zona de generación hasta la costa, el oleaje sufre una serie de procesos que modulan y organizan la energía cedida por el viento. En este viaje por el océano, el oleaje pasa de ser una oscilación caótica e impredecible de la superficie, a ir adquiriendo la estructura típica del mar de fondo. Desde aguas profundas hasta la rompiente, el oleaje sufre una serie de procesos inducidos por el fondo. La presencia de cabos, islas, bajos o cañones submarinos dibuja un gradiente no solo en la altura de ola, sino también en la estructura que el oleaje adquiere antes de romper. Aun así, justo antes de la rotura, a una profundidad comprendida entre 10 y 0.5 m, el fondo ha de contener ciertas anomalías que produzcan la rotura en ángulo del oleaje.

Por tanto, la disponibilidad del recurso surf puede ser analizada a diferentes escalas espaciales, en las cuales, han de considerarse una serie de procesos físicos específicos. Éstas son:

- **Escala local o de rompiente:** la cual determina bajo qué condiciones de oleaje, viento, nivel del mar y estado morfodinámico, una determinada rompiente genera olas surfeables. En esta escala, procesos como la rotura tridimensional del oleaje, la interacción del oleaje y el viento, las corrientes, así como el transporte de sedimentos adquieren una importancia fundamental en la calidad de las olas.
- **Escala regional:** la cual determina qué zonas de la costa dentro de una región determinada presentan mejores condiciones para la práctica del surf. En esta escala, son los procesos de propagación del oleaje desde aguas profundas a

someras los que en mayor medida controlan la disponibilidad del recurso sur en un tramo de costa.

- **Escala global:** la cual identifica qué regiones en el globo presentan mejores condiciones para la práctica de este deporte. En la escala global, son los procesos atmosféricos macro y meso escalares los que controlan la disponibilidad del recurso. Además, los fenómenos de generación y propagación del oleaje por aguas profundas juegan un papel determinante en la cantidad y calidad de las olas para el surf.

Para analizar la variabilidad temporal, se han considerado tres escalas principales:

- **Escala intranual o estacional:** la cual determina la distribución espacial del recurso e identifica en que época del año ocurren las mejores condiciones de surf. Para ello se recurre al análisis estadístico de variables geofísicas, para lo cual ha de disponerse de registros suficientemente largos (5-10 años) como para que la información obtenida sea concluyente para la unidad de tiempo establecida (análisis de la intensidad o de la frecuencia, régimen medio o extremal mensual, estacional, o anual).
- **Escala interanual:** la cual identifica y cuantifica la variabilidad en la disponibilidad del recurso que ocurre de unos años a otros. Para analizar la variabilidad interanual de las condiciones de surf son necesarios registros que cubran varios ciclos de los principales modos de variabilidad conocidos (20-30 años).
- **Escala de largo plazo:** la variabilidad en el largo plazo identifica y cuantifica la tendencia implícita en la disponibilidad del recurso durante el periodo de tiempo analizado. Para ello se necesita de registros de una duración que cubra uno o varios periodos climáticos (>30 años).

En la figura 1.9 se muestra el esquema conceptual del problema planteado, se enumeran los procesos físicos a resolver en cada escala espacial, las aproximaciones posibles para

resolver los fenómenos de interés, así como el análisis estadístico necesario para abordar las distintas escalas temporales.

	Escalas temporales	Aproximaciones		Estacional	Interanual	Largo plazo >30 años
Escalas espaciales		Procesos		¿En qué estación o meses ocurren mejores condiciones?	¿Qué cambios en la disponibilidad de condiciones de surf son esperables de unos años a otros? ¿De qué dependen estos cambios?	¿Está afectando el cambio climático a la disponibilidad de condiciones de surf?
Establecimientos de niveles de calidad. Rangos de las variables consideradas. Condiciones genéricas.						
GLOBAL	¿Dónde ocurren las mejores olas?	Circulación general de la atmósfera, borrascas, anticyclones, huracanes. Generación de oleaje, propagación por aguas profundas. Dispersión radial y frecuencial	Modelos globales: atmosféricos y oceánicos. Modelos de generación de oleaje.	Modelo estadístico. Análisis de oleaje y viento en el largo plazo junto a aquellas variables consideradas relevantes (temperatura, duración del día, nivel del mar).	Análisis de la correlación de la ocurrencia de condiciones de surf con diferentes patrones climáticos.	Tendencias
Establecimientos de niveles de calidad. Rangos de las variables consideradas. Condiciones generales para las rompientes de la región.						
REGIONAL 100-200 km	¿Dónde ocurren las mejores olas?	Propagación del oleaje en aguas someras. Refracción, difracción y asomeramiento, transformación del espectro direccional.	Modelos de viento de alta resolución. Modelos de propagación de oleaje 2D. Análisis espectral del oleaje. Downscaling estadístico.	Modelo estadístico. Análisis de oleaje y viento en el largo plazo, el resto de variables presentan valores homogéneos a lo largo de la región.	Análisis de la correlación de la ocurrencia de condiciones de surf con diferentes patrones climáticos.	Tendencias
Establecimientos de niveles de calidad. Rangos de las variables consideradas. Condiciones específicas de la rompiente						
LOCAL 50 m-1 Km	¿Qué condiciones generan buenas olas en una rompiente?	Rotura tridimensional del oleaje, iteración oleaje corriente y viento. Transporte de sedimentos.	Modelos de viento de alta resolución. Modelos de simulación de oleaje 3D. Navier-Stokes. Modelos de transporte de sedimentos. Observación directa.	Análisis de la probabilidad conjunta de las variables involucradas. Oleaje, viento, nivel del mar, corrientes.	Análisis de la correlación de la ocurrencia de condiciones de surf con diferentes patrones climáticos.	Tendencias

Figura 19. Esquema conceptual del problema planteado, escalas espaciotemporales, procesos y aproximaciones.

