

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y TÉCNICAS
DEL AGUA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

TESIS DOCTORAL

**METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DE BASES DE
DATOS DE REANÁLISIS DE CLIMA MARÍTIMO**

Presentada por: ANTONIO TOMÁS SAMPEDRO

**Dirigida por: FERNANDO J. MÉNDEZ INCERA
IÑIGO J. LOSADA RODRÍGUEZ**

Mayo, 2009

CAPÍTULO 2
DATOS DE OLEAJE

2.1. Introducción.

Dentro de la metodología general de transferencia de información de oleaje hasta el punto donde se necesita caracterizar el oleaje para un fin concreto (Bases de Datos → Calibración → Clasificación → Propagación → Regímenes), en este capítulo se va a describir el estado de conocimiento actual del primer punto, las bases de datos de oleaje.

Para poder estudiar las bases de datos de oleaje, primeramente se describen los parámetros que caracterizan el oleaje. Después se clasifican las distintas fuentes de información mediante las cuales se puede obtener o generar datos de oleaje. Posteriormente se detallan las bases de datos de oleaje que se actualizan con la recopilación de los datos producidos por las principales fuentes de información. Finalmente, se resume el estado de conocimiento sobre estos temas, destacando los aspectos más relevantes y característicos.

2.2. Parámetros de oleaje.

Se denomina oleaje al moviendo de la superficie del mar. Dicho fenómeno es muy complejo, pero básicamente consiste en la superposición e interacción de multitud de ondas producidas por el viento que se propagan por la superficie de mares y océanos.

Debido a la complejidad del problema, para poder caracterizar y parametrizar el oleaje, se suele asumir que el oleaje es un proceso estocástico (aleatorio) y estacionario (los estadísticos o parámetros del proceso se mantienen invariables en el tiempo). Como el oleaje es la respuesta del mar a condiciones atmosféricas no estacionarias, se debe trabajar con periodos de tiempo suficientemente cortos como para que el oleaje sea débilmente estacionario, a estos intervalos de tiempo se los denomina estados de mar¹. A su vez, la duración de los estados de mar debe ser lo suficientemente larga como para que contenga la necesaria información estadística del proceso.

Para analizar el oleaje de cada estado de mar se puede representar matemáticamente la elevación de la superficie libre del mar como la composición de infinitas ondas

¹ Estado de mar: normalmente los estados de mar son de una hora de duración, aunque pueden ser menores; generalmente se suele hablar indistintamente de estados de mar y parámetros de estado de mar para referirse a los distintos parámetros calculados durante un estado de mar (por ejemplo la altura de ola significativa).

monocromáticas². Así, en el dominio del tiempo, la evolución de la superficie del mar es la suma de infinitas ondas temporales; en cambio, en el dominio de la frecuencia, el espectro o función densidad espectral del desplazamiento de la superficie libre representa la energía del oleaje promediada en el estado de mar para cada frecuencia (ver figura 2.1).

Por lo tanto, se puede caracterizar cada estado de mar a través de parámetros estadísticos (calculados en el dominio del tiempo) o de parámetros espectrales (analizados en el dominio de la frecuencia).

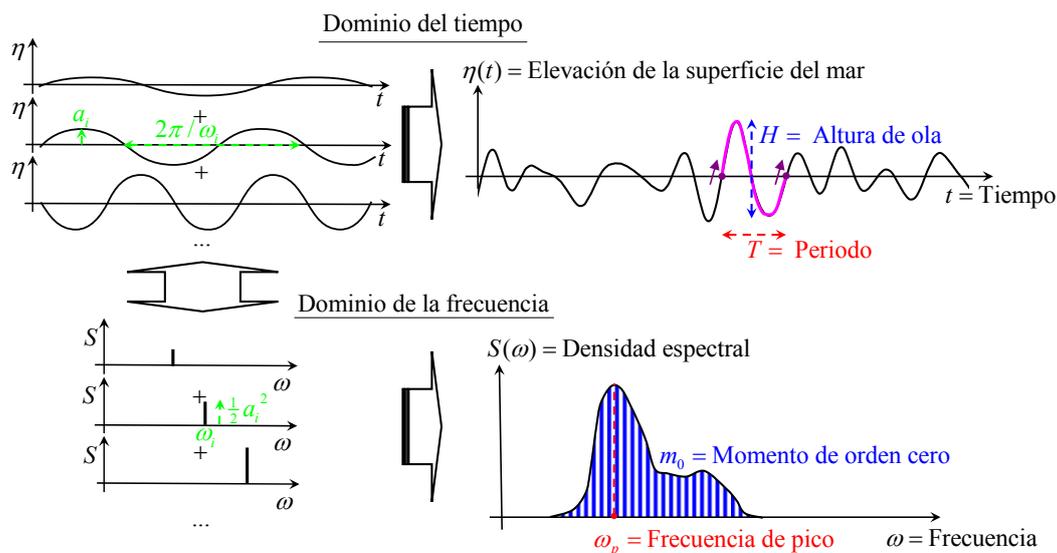


Figura 2.1. Esquema del estudio del oleaje en los dominios del tiempo (arriba) y de la frecuencia (abajo).

Existen multitud de parámetros estadísticos con los que se puede caracterizar el oleaje. Generalmente, se emplea uno de altura de ola (H) y otro de periodo (T), siendo usual asumir para su definición el criterio o método de los pasos ascendentes por cero (ver figura 2.1). Los parámetros estadísticos más utilizados se describen a continuación:

- Altura de ola significativa (H_s o $H_{1/3}$): es la altura media de las $n/3$ mayores olas de un registro de la superficie libre compuesto por n olas y se representa por la ecuación:

$$H_{1/3} = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^{n/3} H_i \tag{2.1}$$

H_s es el parámetro más extendido a la hora de describir un estado de mar y coincide aproximadamente con la percepción visual de la altura de ola.

² Onda monocromática en profundidades indefinidas: $\eta(x, y, t) = a \cos\{\omega^2/g(x \cos \theta + y \sin \theta) - \omega t + \phi\}$ donde a es la amplitud de la onda, ω su frecuencia angular, ϕ su fase y θ es el ángulo de incidencia de la onda según el sistema de coordenadas (x, y) . Su energía se representa por $\frac{1}{2} \rho g a^2$.

- Altura de ola media (\bar{H}): es la media de todas las olas del registro, siendo:

$$\bar{H} = \langle H \rangle \quad (2.2)$$

donde se denota por $\langle \rangle$ a la media aritmética de una variable: $\langle X \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$

- Altura de ola media cuadrática (H_{rms}): es la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las alturas de ola del registro, definida como:

$$H_{rms} = \sqrt{\langle H^2 \rangle} \quad (2.3)$$

- Altura de ola máxima ($H_{\max,n}$): es la altura de ola correspondiente a la mayor ola de un registro de n olas.
- Altura de ola media de las $1/N$ mayores olas ($H_{1/N}$): es la altura media de las n/N mayores olas de un registro de n olas, representada como:

$$H_{1/N} = \frac{N}{n} \sum_{i=1}^{n/N} H_i \quad (2.4)$$

Para la altura de ola significativa $N = 3$ (ver ecuación 2.1); también son muy utilizados $H_{1/10}$ y $H_{1/20}$.

- Periodo medio (T_m): es la media de los periodos del registro y se define por:

$$T_m = \langle T \rangle \quad (2.5)$$

- Periodo significativo ($T_{1/3}$): es la media de los $n/3$ mayores periodos de un registro de n olas, siendo su representación:

$$T_{1/3} = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^{n/3} T_i \quad (2.6)$$

- Periodo medio condicionado a la altura de ola significativa ($T_{H_{1/3}}$): es la media de los periodos de las $n/3$ mayores olas de un registro de n olas, siendo su representación:

$$T_{H_{1/3}} = \frac{3}{n} \sum_{i=1}^{n/3} (T / H_{1/3})_i \quad (2.7)$$

Los diferentes parámetros espectrales mayoritariamente se definen a partir de distintas relaciones de los momentos de la función densidad espectral, siendo el momento de orden r de la función densidad espectral $S(\omega)$:

$$m_r = \int_0^{\infty} \omega^r S(\omega) d\omega; \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

El momento de orden cero (m_0 , ver figura 2.1) representa el área del espectro y coincide con la varianza de la elevación de la superficie libre, que a su vez es proporcional a la energía por unidad de área del estado de mar.

En función de los distintos momentos (ecuación 2.8) se pueden definir multitud de parámetros que caracterizan la forma del espectro del oleaje, los más importantes son:

- Altura de ola de momento de orden cero (H_{m0}): es cuatro veces la raíz cuadrada del momento de orden cero, siendo su definición exacta:

$$H_{m0} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad (2.9)$$

Si el espectro es de banda estrecha (ver definición a continuación) esta expresión coincide con la altura de ola significativa (ecuación 2.1), $H_{m0} = H_s$.

- Se pueden definir diversos periodos del oleaje de la forma:

$$T_{ij} = 2\pi \left(\frac{m_i}{m_j} \right)^{\frac{i+1}{j}} \quad (2.10)$$

Así, por ejemplo, T_{01} corresponde al periodo asociado a la frecuencia media (\bar{T}), T_{02} es el más utilizado, pues corresponde al periodo medio de pasos ascendentes por cero (T_m , ver ecuación 2.5) y otros como el T_{-10} son también ampliamente utilizados.

- Periodo de pico (T_p): es el asociado a la frecuencia de pico (ω_p , ver figura 2.1), que corresponde a la del máximo del espectro, se define como:

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \quad (2.11)$$

- Anchura espectral de Longuet-Higgins (ν): mide la concentración de energía alrededor de la frecuencia media y se calcula mediante la expresión:

$$\nu^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \quad (2.12)$$

$\nu^2 \rightarrow 0$ cuando toda la energía se concentra en una única frecuencia, aumentando su valor cuando la energía está dispersa en muchas frecuencias.

- El apuntamiento espectral de Goda (Q_p) se define como:

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} \omega S^2(\omega) d\omega \quad (2.13)$$

En general el apuntamiento espectral aumenta cuanto más estrecho (apuntado) es el espectro, luego si la anchura espectral aumenta, el apuntamiento espectral disminuye y viceversa.

Hasta ahora las relaciones presentadas corresponden al espectro unidimensional de frecuencias, pero el oleaje, como composición de diferentes ondas provenientes de distintas direcciones, es direccional; por lo que se hace necesario caracterizar el espectro direccional de oleaje de cada estado de mar ($S(\omega, \theta)$).

Frecuentemente la información del oleaje proviene de la medida de un solo parámetro de oleaje (por ejemplo, el desplazamiento vertical de superficie libre) en un punto, que únicamente permite caracterizar el espectro unidimensional. Por ello el método clásico para definir el espectro direccional o bidimensional es multiplicar al espectro unidimensional por una función de dispersión direccional que depende de múltiples parámetros (como la frecuencia de pico y su dirección media de propagación). De entre las diferentes funciones paramétricas de dispersión direccional se suele utilizar las de tipo coseno (por ejemplo, ver Massel (1996) distintas expresiones de dispersión direccional).

Pero la forma tradicional de caracterizar el oleaje con funciones de dispersión direccional no es válida para estados de mar compuestos en los que se superponen oleajes de diferentes características y direcciones. Por ejemplo, en la figura 2.2 se presenta un caso en el que el espectro direccional se compone de un oleaje generado localmente por el viento (tipo *sea*) con otro propagado desde otras áreas de generación (tipo *swell*). En este caso habría que obtener una función de dispersión direccional para cada una de las dos componentes.

Como se observa en la figura 2.2 los oleajes tipo *sea* (mar de viento) tienen espectros de banda ancha, pero a medida que salen de la zona de generación aumenta su periodo (disminuye su frecuencia) y se van apuntando, es por eso por lo que los oleajes tipo *swell* (mar de fondo) tienen espectros de banda estrecha.

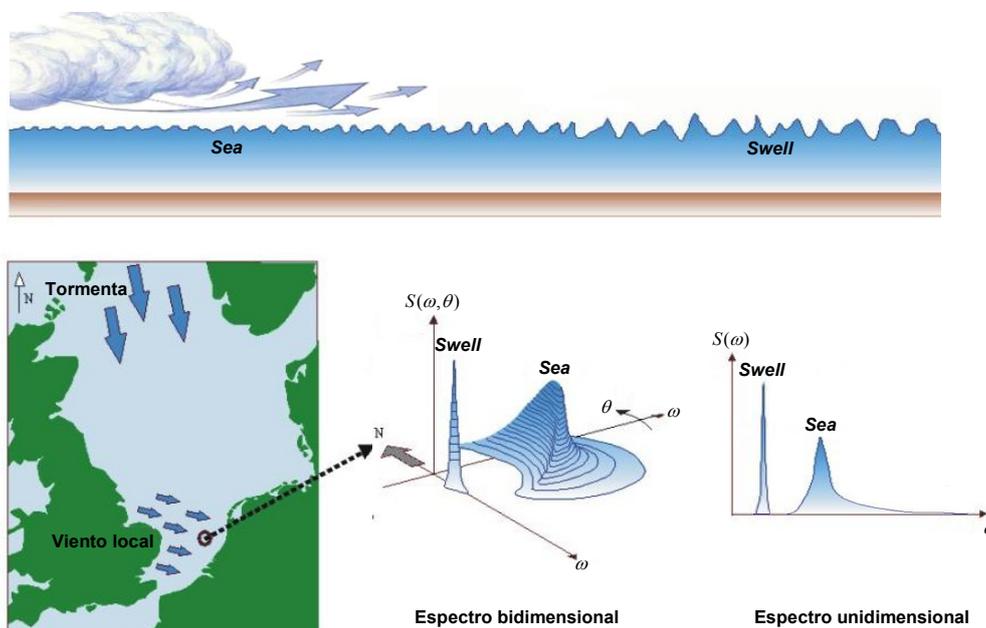


Figura 2.2. Esquema del oleaje tipo *sea* (mar de viento) y tipo *swell* (mar de fondo); modificado del original de Holthuijsen (2007).

Cuando se tiene la descripción completa del espectro direccional del oleaje $S(\omega, \theta)$, obtenido, por ejemplo, a partir de una boya direccional o a través de la salida de un modelo numérico de generación de oleaje, en lugar de caracterizar el espectro unidimensional y multiplicarlo por una función de dispersión direccional se puede caracterizar la forma del espectro direccional del oleaje directamente. De hecho, existen multitud de parámetros que se definen a partir de distintas integraciones del espectro direccional, como la dirección media o la dirección del pico, siendo la que más se utiliza:

- La dirección media del oleaje, θ_m (θ^3), que se define como:

$$\theta_m = \arctan \left[\frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin \theta S(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos \theta S(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right] \tag{2.14}$$

³ La dirección media del oleaje, θ_m , generalmente se denota directamente por θ cuando se sobreentiende que es un parámetro de estado de mar.

2.3. Fuentes de información.

Las fuentes de información de oleaje existentes se van a clasificar en función del método o instrumento que ha producido o generado dichos datos de oleaje. Así una primera clasificación podría ser separar en datos visuales, datos instrumentales y datos generados con modelos numéricos. Los datos visuales son los que observadores entrenados estiman desde barcos en ruta; los instrumentales los que se miden directamente del mar y los generados con modelos numéricos los que simulan el estado del mar a partir del estado atmosférico. En la figura 2.3 se presenta una clasificación de todas estas fuentes de datos de oleaje.

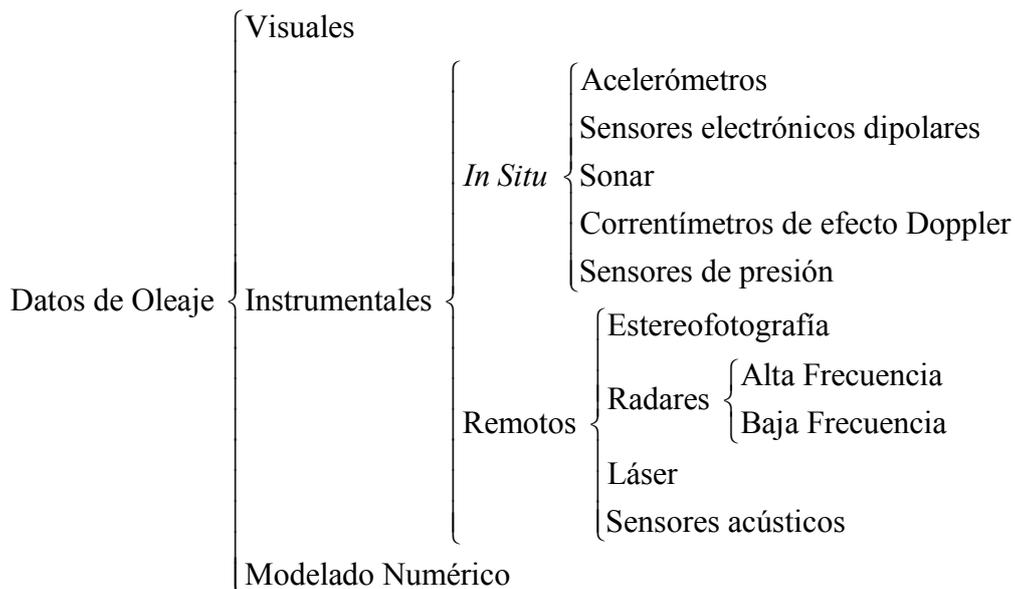


Figura 2.3. Clasificación de las distintas fuentes de información de datos de oleaje.

Dentro de los datos instrumentales existen muchos tipos (como puede verse en la figura 2.3); por una parte están los instrumentales *in situ*, en los que el instrumento de medida se encuentra en el mar y por otra parte están los instrumentales remotos, en los que el aparato de medida se sitúa fuera del agua. Dentro de cada uno de ambos tipos existen múltiples tipologías, que se van a explicar a través de los distintos tipos de instrumentos (para más detalles consultar por ejemplo Holthuijsen, 2007). Los datos visuales y numéricos se desarrollarán con posterioridad en los apartados 2.4.1 y 2.4.5 respectivamente.

2.3.1. Información instrumental.

Dentro de los instrumentos *in situ* para medir datos de oleaje existen muchos tipos, el más utilizado en la actualidad son los acelerómetros que se sitúan en boyas flotando en la superficie (ver figura 2.4), las boyas están lastradas al fondo para que sus movimientos horizontales sean pequeños y se pueda considerar que el oleaje que miden es el de una

posición fija. El oleaje que estima el acelerómetro es escalar, pero con la ayuda de otros instrumentos que llevan las boyas se puede medir el oleaje direccional (en el apartado 2.4.3 se explican con más detalle).

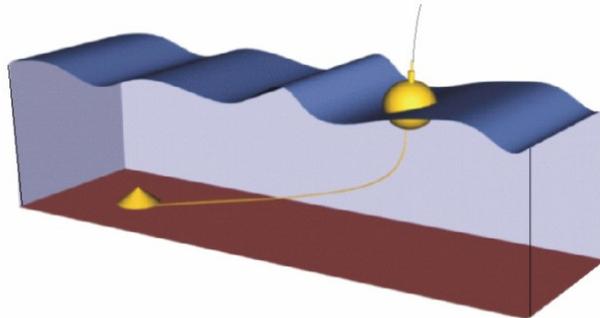


Figura 2.4. Esquema de boya con acelerómetro para medir el oleaje (tomado de Holthuijsen, 2007).

Otros instrumentos *in situ* son los sensores electrónicos dipolares, que sitúan dipolos (alambres o membranas) suspendidos verticalmente desde plataformas *off-shore* o estructuras fijas en el mar midiendo la longitud de dipolo seco por encima de la superficie. Esto se puede hacer midiendo la resistencia eléctrica de la parte seca (sensores resistivos) o midiendo su capacitancia (sensores capacitivos). En la figura 2.5 se puede ver un esquema de ellos. Solamente con un sensor se puede medir el oleaje escalar, siendo necesario instalar al menos tres para determinar la dirección.

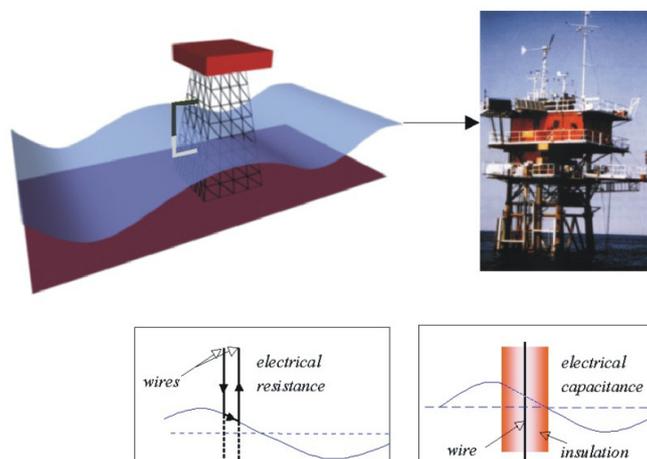


Figura 2.5. Croquis de sensores electrónicos bipolares sobre estructura *off-shore* (tomado de Holthuijsen, 2007).

Además de los instrumentos *in situ* anteriormente mencionados (acelerómetros, sensores resistivos y capacitivos) existen otros instrumentos que se instalan bajo la superficie del mar (generalmente en el fondo para profundidades someras o hasta unos 200 m) como son los sonar (sensores acústicos sumergidos), los correntímetros de efecto Doppler o los sensores de presión. Los sonar calculan la posición de la superficie del agua mandando un haz de ondas

de frecuencia ultrasónica⁴ hacia la superficie y miden el tiempo que tarda en volver el haz reflejado. Los sensores de presión miden la presión dinámica producida por el oleaje. A partir de ella y mediante la teoría lineal de ondas se puede determinar el oleaje escalar en ese punto. Para obtener el oleaje direccional se necesitan al menos tres haces de ondas de sonar o tres sensores de presión. En cambio, los correntímetros que mandan también haces de ondas de frecuencia ultrasónica, por efecto Doppler, miden el movimiento del agua, con magnitud y dirección, con lo que se puede deducir directamente el oleaje direccional con un solo instrumento. A veces se usa una combinación de estos instrumentos (ver figura 2.6) como por ejemplo los ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*) que integran tres correntímetros radiando a diferentes ángulos y un sensor de presión.

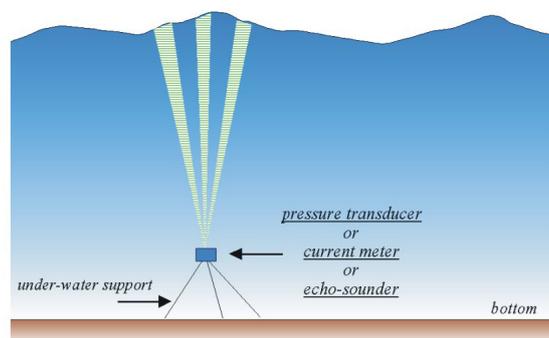


Figura 2.6. Esquema de sensores *in situ* situados en el fondo (tomado de Holthuijsen, 2007).

A su vez, como los sensores *in situ*, también existen muchos tipos de instrumentos remotos. El principio básico de todos ellos es recibir las reflexiones de la superficie del mar de la luz visible, infrarroja o la energía de radar. Las técnicas *in situ* miden la evolución de la superficie del mar en un punto, en cambio muchos de los instrumentos remotos registran grandes áreas instantáneamente o en un corto periodo de tiempo.

La estereofotografía es una técnica remota que fotografía a alta resolución la superficie del mar, cada pocos segundos, desde dos aviones con cámaras sincronizadas para obtener de las áreas superpuestas la imagen tridimensional del oleaje. Es una técnica muy utilizada para medir la topografía del terreno. En la figura 2.7 se presenta un esquema de funcionamiento para medir el oleaje tridimensional.

⁴ Frecuencia ultrasónica: Frecuencia de una onda acústica por encima de la audición humana (20kHz). Los sonar para medir oleaje suelen emitir ondas con frecuencias del orden de 1MHz.

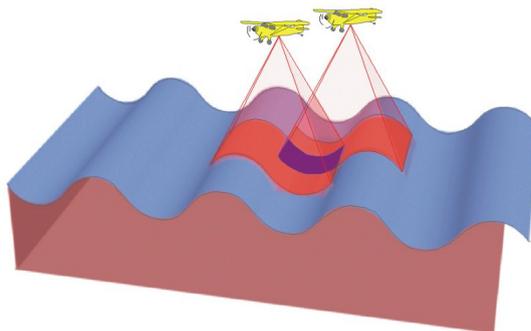


Figura 2.7. Esquema de la estereofotografía aplicada a la medición del oleaje (tomado de Holthuisen, 2007).

Los instrumentos remotos más utilizados en la actualidad son los radares que mandan pulsos de ondas hacia el mar y en función del pulso reflejado se puede determinar el oleaje existente. Existen multitud de clases de radares que pueden ser utilizados para medir el oleaje. En la figura 2.8 se presentan las fotos de varios tipos de radares que han sido instalados en las costas españolas. Así el radar del Faro de Finisterre (antena de radar HF) o el de Cabo de Peñas (antena móvil de radar de banda X) miden el campo espacial de oleaje, en cambio el del Puerto de Almería (mareógrafo de radar) registra sólo el oleaje escalar bajo su posición. A continuación, se van a explicar las particularidades de estos radares mostrados, así como también el resto de las clases de radares.

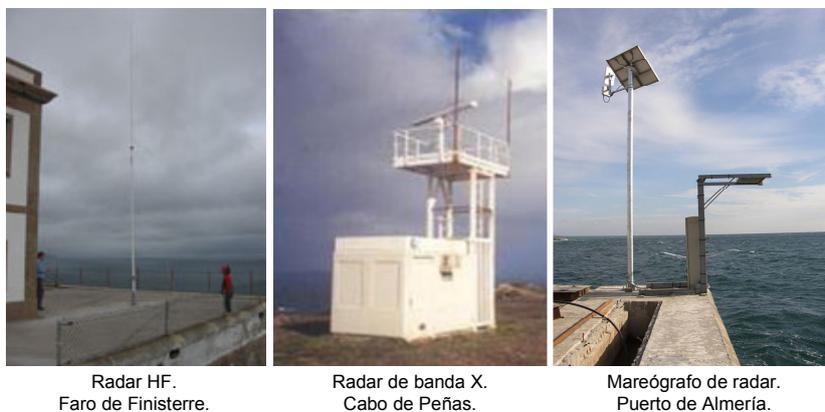


Figura 2.8. Algunos radares de medición del oleaje situados en la costa.

Generalmente los radares se clasifican en función de su frecuencia de emisión de ondas, distinguiéndose los radares de alta frecuencia y los radares de baja frecuencia. Las ondas de alta frecuencia, también denominadas HF (*High Frequency*), ocupan el rango de frecuencias entre 3MHz y 30MHz. En cambio las ondas de baja frecuencia o microondas se suelen situar entre 0.3 GHz y 30 GHz; en la figura 2.9 se acotan las frecuencias de las distintas bandas de frecuencia de microondas.

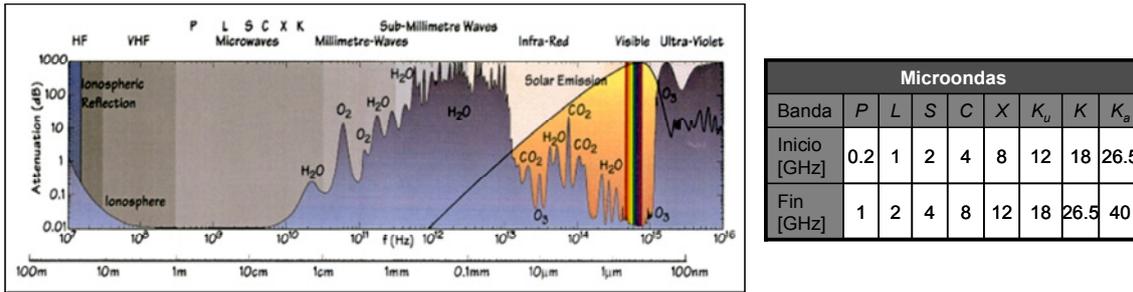


Figura 2.9. Espectro de frecuencias desde HF hasta luz ultravioleta (izquierda, tomado de ESA, *European Space Agency*, <http://earth.esa.int/>) y bandas de microondas (derecha)

Los radares HF se colocan en zonas elevadas de la costa (como en el Faro de Finisterre de la figura 2.8) y fundamentalmente han sido utilizados para medir corrientes superficiales, aunque a partir de las imágenes de los pulsos reflejados por el agua se puede medir el oleaje hasta casi el horizonte. Cuando se tiene información de dos o más radares se puede determinar no sólo la magnitud del oleaje sino también su dirección. En Estados Unidos han sido abundantemente implantados desde los años 70, midiendo corrientes superficiales hasta distancias del orden de los 150 km; en España ha habido varias experiencias temporales (sin instalaciones fijas), en las que se ha determinado el espectro direccional de oleaje hasta 50 km de la costa (con resoluciones espaciales de 200 m). En la figura 2.10 se muestra uno de los resultados de la experiencia desarrollada en Gijón en el marco del proyecto EUROROSE.

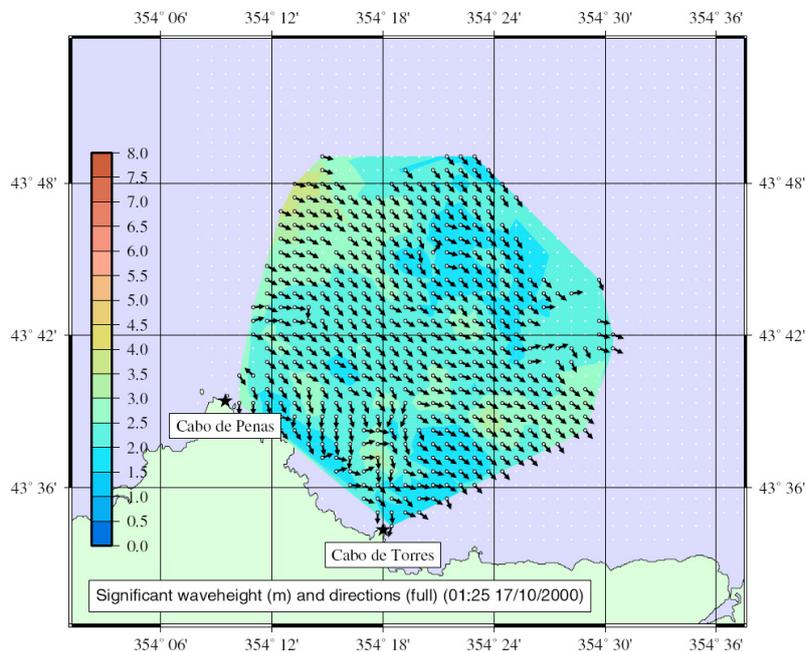


Figura 2.10. Altura de ola y dirección media del proyecto EUROROSE en Gijón (tomado de Gurgel *et al.*, 2001).

El otro tipo de radares son los radares de baja frecuencia o microondas. Existen muchos tipos en función de la frecuencia de emisión (ver los distintos tipos en la figura 2.9), del procesado que se hace de la señal recibida y de dónde estén ubicados los radares (en tierra, barcos,

CAPÍTULO 2

aviones, satélites,...). Los que mayor trascendencia tienen actualmente son los que se sitúan en satélites (por ello se explican en detalle más adelante en el apartado 2.4.4), de entre ellos dos son los que dan información de oleaje, los altímetros de radar (RA, *Radar Altimeter*) y los radares de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*).

Los RA funcionan emitiendo pulsos de la banda de frecuencia K_u y miden el tiempo que tarda en llegar el pulso reflejado en la superficie del mar, determinando así la distancia entre el satélite (o el avión) y el mar, es decir el nivel del mar. Para determinar la altura de ola se correlaciona con la rugosidad del mar (oleaje) que se calcula a partir de la forma del pulso reflejado. No se puede determinar el espectro de oleaje o distinguir las diferentes olas en la imagen recibida, pues no se tiene suficiente resolución, para ello los satélites deberían llevar antenas mucho mayores.

Los SAR, a pesar de llevar antenas pequeñas, emiten de una manera sincronizada con su movimiento, de manera que simulan tener una antena de grandes dimensiones. Generalmente emiten en banda C (algunos también en banda L) y consiguen imágenes con suficiente resolución como para determinar el espectro direccional del oleaje (no sólo la altura de ola como los RA).

Un tipo de radar de microondas que llevan los barcos para detectar obstáculos son los radares de banda X (aunque también los hay de banda S o C). Estos radares determinan el oleaje que circunda el barco (o por lo menos los patrones de las mayores olas) a partir de la señal que se refleja en las olas y llega de nuevo al barco. En la figura 2.11 se muestra un ejemplo de la superficie libre medida por un radar de banda X . Los radares de banda X , típicamente instalados en los barcos, también pueden instalarse en la costa, como el presentado en la foto de la figura 2.8. Cabe señalar que tanto para los radares HF como para los de banda X , como para todos los radares que procesan la imagen de la señal reflejada de las olas, estas olas deben tener irregularidades para permitir el mayor número de direcciones posibles de reflexión, de manera que se tenga la oportunidad de que el pulso reflejado llegue al receptor. Estas pequeñas irregularidades pueden ser generadas por el viento, corrientes o rotura del oleaje. Si no existen (casos de oleaje de fondo sin viento, por ejemplo) la señal reflejada y su oleaje obtenido no será correctamente representado.

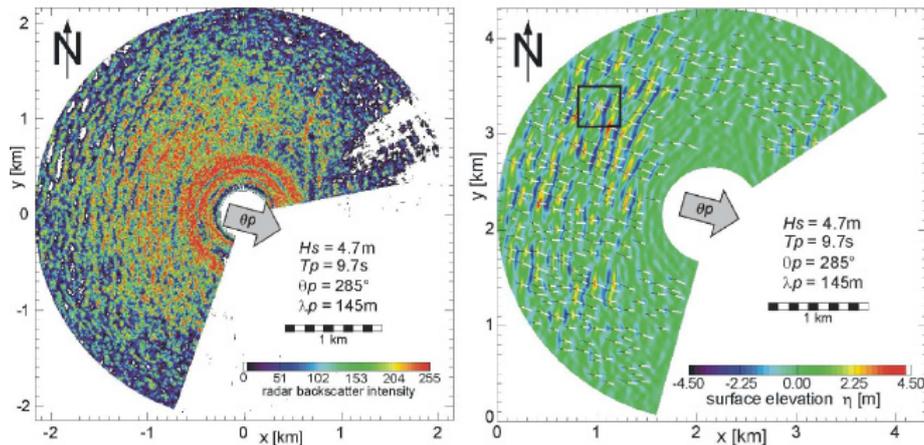


Figura 2.11. Imagen de un radar de banda X (izquierda) y su superficie libre (derecha), tomado de Reichert *et al.* (2005)

Otro tipo de radar de banda X que en los últimos años se está implementando en muchos puertos españoles es el mareógrafo de radar, que es un mareógrafo que determina la superficie libre midiendo el tiempo que tarda en volver el pulso emitido y con ella el oleaje. Con este sistema sólo se puede medir el oleaje escalar en un punto (que generalmente es la agitación en un puerto), pues necesita instalarse en una ubicación fija sobre el mar (muelles o diques verticales) y orientado perpendicularmente a la superficie del mar (ver foto en la figura 2.8).

Existen también otros instrumentos remotos que básicamente miden la distancia vertical desde el instrumento a la superficie del mar (distanciómetros) y suelen estar situados en plataformas fijas por encima del mar (como los mareógrafos de radar), son los láser y los sensores acústicos. Los láseres utilizan la luz (visible o infrarroja) y los sensores acústicos ondas de sonido para medir la distancia instantánea al mar (midiendo el tiempo que tarda en ir y volver el pulso emitido). Ambos instrumentos exclusivamente dan el oleaje escalar en un punto, aunque existe una técnica láser que es capaz de dar una imagen tridimensional del oleaje (ATM, *Airborne Topographic Mapper*) que consiste en instalar un láser con un movimiento circular en un avión, de manera que se obtenga información del oleaje similar a la generada con estereofotografía.

2.3.2. Resumen.

Finalmente, para resumir y resaltar la distribución espacial de los diferentes tipos de fuentes de información, se esquematizan en la figura 2.12 los siguientes grupos de datos:

- Visuales: los datos visuales no son instrumentales, sino que son estimaciones de oleaje realizadas desde barcos; tienen una distribución espacial heterogénea, siguiendo fundamentalmente las rutas de navegación.

- Boyas: las boyas son datos instrumentales *in situ* que llevan acelerómetros, miden el oleaje en una posición prácticamente fija y pueden ubicarse a cualquier profundidad.
- *In situ* sobre estructuras: estos datos instrumentales *in situ* se sitúan sobre estructuras *off-shore* o diques, suelen ser sensores resistivos o capacitivos y miden el oleaje siempre en la misma ubicación.
- *In situ* en el fondo: estos datos instrumentales *in situ* están en el interior del agua (por ejemplo el sonar, el correntímetro de efecto Doppler y el sensor de presión); miden el oleaje en la misma posición y se suelen ubicar a profundidades no mayores de 200 m.
- Satélites: los datos de satélites son instrumental remotos pues orbitan a unos 1000 km de la superficie del agua, siendo los radares de microondas (RA y SAR) sus instrumentos. Pasan siempre por encima de las mismas posiciones y cubren la totalidad de los mares de la Tierra.
- Aviones: los aviones pueden portar instrumentos remotos de medición del oleaje como cámaras estereofotográficas, radares de microondas o láser, dando información detallada del oleaje para determinadas zonas de interés.
- Radar HF: los radares HF son instrumentos remotos que miden el oleaje de grandes zonas próximas a las costas donde están ubicadas (del orden de 10 o 100 km, según la configuración de cada instalación).
- Remotos desde barcos: los barcos pueden llevar instrumentos remotos radar de banda X, que determinan el oleaje alrededor del barco, aunque dichos instrumentos también pueden instalarse en tierra o en estructura fijas.
- Remotos sobre estructuras: muchas estructuras fijas como diques, muelles u *off-shore* tienen instrumentos remotos para medir el oleaje que incide puntualmente sobre ellas, como son el mareógrafo de radar, el láser o el sensor acústico, aunque dichos instrumentos también pueden medir remotamente el oleaje desde barcos o estructuras móviles.
- Modelado numérico: los datos generados por modelos numéricos no son datos instrumentales, calculan el oleaje a partir de condiciones globales de la atmósfera en la superficie libre del mar. Existe información a escala global de dichos modelos y con

mayores resoluciones para modelos regionales, suministrando la información de manera homogénea y regularmente espaciada.

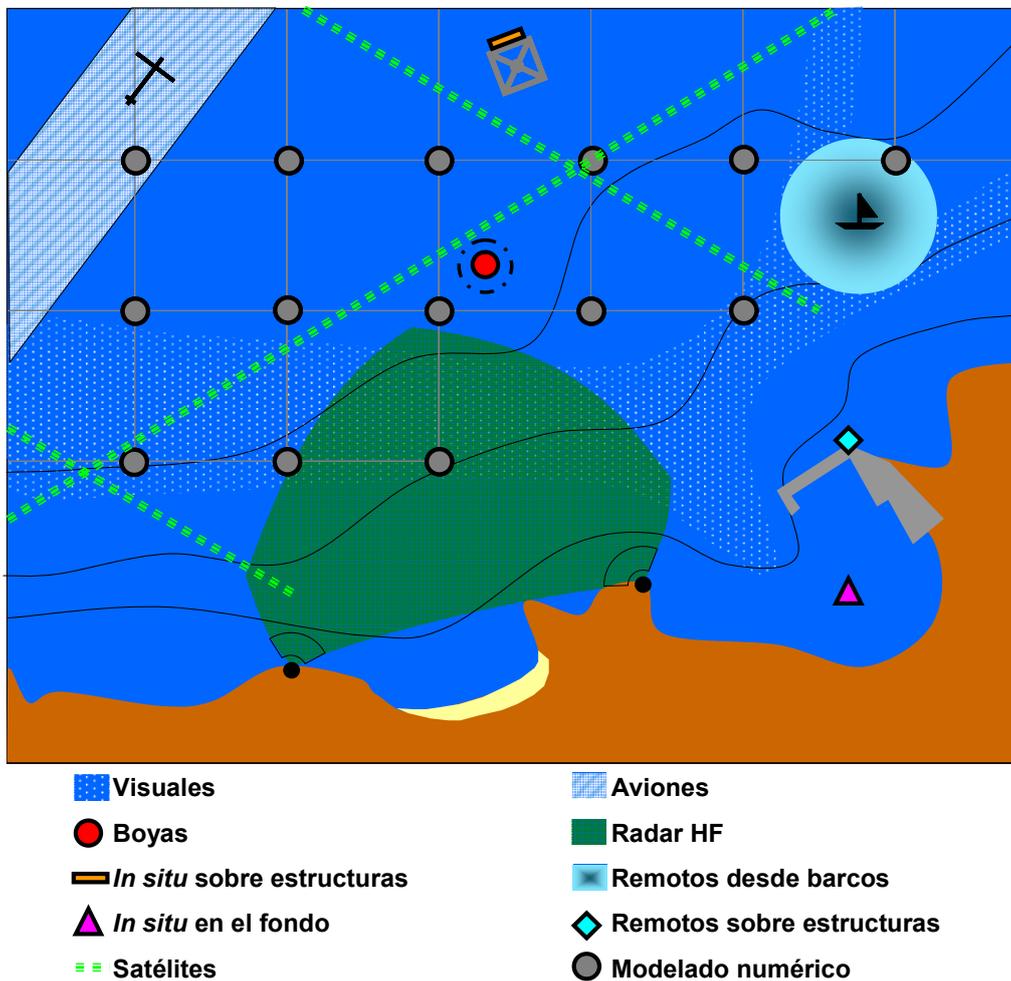


Figura 2.12. Esquema de la distribución espacial de las posibles distintas fuentes de información para una zona.

2.4. Bases de datos.

A partir de la clasificación de las fuentes de información de oleaje, se va a explicar con detalle diferentes bases de datos de oleaje generadas a partir del almacenamiento continuado de datos de oleaje de las distintas fuentes que se han considerado más importantes, ya sea por su repercusión histórica, uso actual o su proyección de crecimiento futuro.

En concreto, se van a explicar las características específicas de las bases de datos de oleaje visuales, barcos meteorológicos, boyas, satélites y modelado numérico. Además, en general, el resto de fuentes de información recopilan información de manera temporal (no continua en el tiempo), de manera que no forman bases de datos propiamente dichas, sino más bien campañas de medidas experimentales o transitorias.

Cabe reseñar que, no por excluir diversas fuentes de información instrumental de oleaje en la descripción de bases de datos de oleaje, debe evitarse su uso. Lógicamente siempre que existan datos, debe analizarse su posible utilización. Por ejemplo, para el diseño de una obra marítima, si únicamente se tienen datos de un radar HF próximo, pueden ser muy útiles para calibrar los datos de modelado numérico de la zona de interés.

2.4.1. Datos visuales.

Los datos de oleaje visuales son estimaciones del estado del mar que realizan observadores entrenados fundamentalmente desde barcos comerciales en ruta, aunque también existen desde barcos meteorológicos o estructuras *off-shore*. En este apartado solo se va a describir los observados desde barcos del tráfico comercial por su repercusión, pues dichos datos visuales fueron la primera base de datos de oleaje a escala global, cubriendo la mayor parte de las áreas marítimas.

Tras la observación de los datos visuales desde barcos del tráfico marítimo comercial, éstos se recopilan con un formato fijo (NWSOH N°1 (2004) es una de las guías para recopilar dichos datos visuales) y se envían a centros internacionales que se encargan de su recopilación, almacenamiento y distribución. En la actualidad la recopilación de esta información (*Voluntary Observing Ships*, VOS) se gestiona por la Organización Mundial Meteorológica (WMO, *World Meteorological Organization*). Una de las bases de datos más completas de datos visuales pertenece al ICOADS (*International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set*, <http://icoads.noaa.gov/>) que tiene datos desde 1784, aunque desde 1853 ya han sido analizados, procesados y homogeneizados en COADS (Woodruff *et al.*, 1987).

Los datos VOS proporcionan la base de datos de oleaje con registros más antiguos, contiene información de la altura de ola, periodo y dirección del oleaje *sea* y del *swell*. Sin embargo, la información recogida sobre el oleaje se realiza a estima y depende del entrenamiento del observador, la altura del punto de observación, ...por lo que deben ser calibrados antes de su utilización (en el apartado 3.3.1 del capítulo 3 se presentan ejemplos de calibración). También es sabido que los buques suelen evitar los grandes temporales, por lo que no debe utilizarse la información visual para la realización de las estadísticas extremales de oleaje. Otro inconveniente es que éstas bases de datos se encuentran irregularmente distribuidas, con mayor densidad de datos en las principales vías de navegación; en la figura 2.13 se muestra el número de datos visuales por cada área de 1° por 1° en un año, en ella se pueden detectar las principales rutas de navegación.

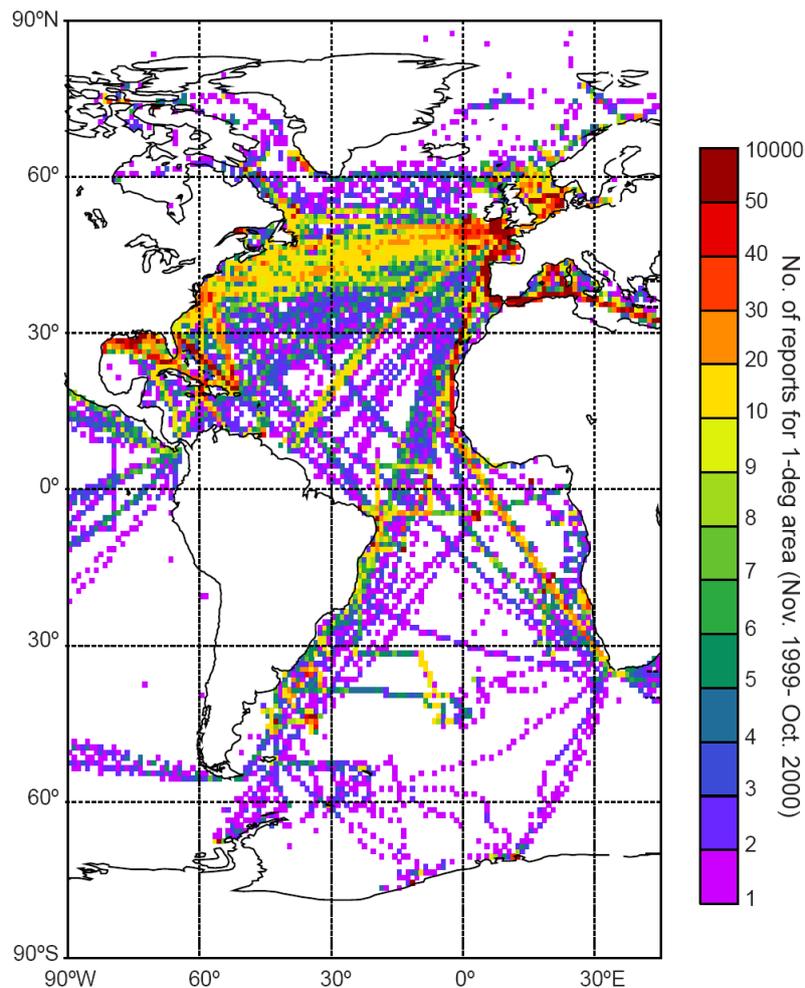


Figura 2.13. Distribución del número de datos visuales en un año (SOC, *Southampton Oceanography Centre*, tomado de <http://www.clivar.org/>).

2.4.2. Datos de barcos meteorológicos.

Una fuente de datos de oleaje muy utilizada para calibrar los datos visuales (ver tabla 3.2 del apartado de calibración de datos visuales 3.3.1 del capítulo 3) son los barcos meteorológicos. Dichos barcos poseen diversos instrumentos para medir el oleaje, algunos *in situ* y otros remotos, pero de manera general se puede suponer que la base de datos de los barcos meteorológicos es instrumental *in situ*, considerando al barco como instrumento de medida.

Así, anterior incluso a la aparición de las boyas, existen los barcos meteorológicos (*Ocean Weather Station*, OWS) que desde los años 40 se mantienen en las mismas posiciones. En la figura 2.14 se muestran las posiciones que tuvieron dichos barcos, pues desde los años 70 se fueron eliminando estaciones hasta la desaparición de la red en los años 90 (aunque quedaron algunos de ellos en funcionamiento no rutinario). También existen barcos que sirven de faros

para la navegación (*lightvessel*) y que de igual manera recopilan datos instrumentales de oleaje.

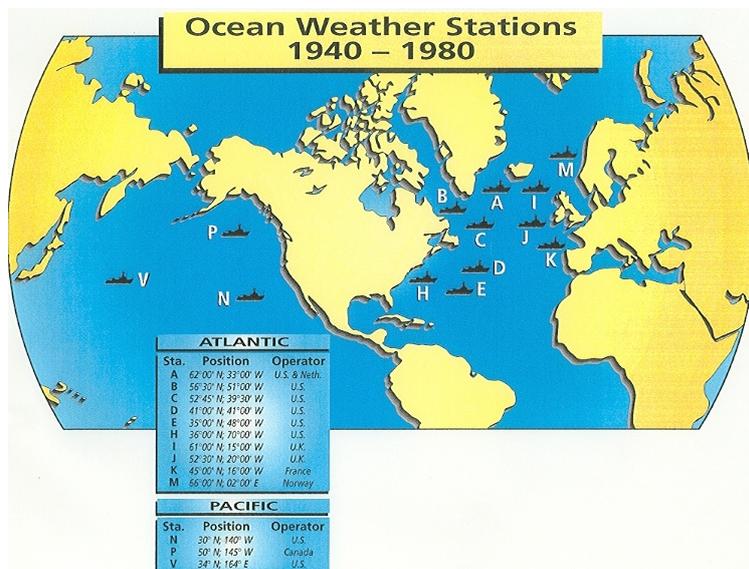


Figura 2.14. Posición de las OWS durante 40 años (tomada de Dinsmore, 2005).

2.4.3. Datos de boyas.

Las boyas son el instrumento de medida de oleaje *in situ* más extendido, pues proporcionan la información más completa y fiable del oleaje en una posición fija. Las boyas siguen el movimiento de la superficie del mar, determinando la evolución de la superficie libre en un punto gracias a un acelerómetro vertical situado en su interior (boyas escalares), pero también hay boyas direccionales que son capaces de estimar la dirección media de cada ola con la ayuda de otros dispositivos que se incorporan sobre dos ejes ortogonales, como inclinómetros o acelerómetros horizontales, y otro para referenciar el norte magnético (usualmente es una brújula). Por lo tanto, con los datos registrados por las boyas se pueden calcular tanto los distintos parámetros espectrales (escalares o direcciones) como los diferentes parámetros estadísticos del oleaje.

Los datos medidos por las boyas suelen enviarse por radio (si están próximas a la costa) o vía satélite a los centros de gestión. También suelen llevar incorporados GPS⁵ para detectar su posición en todo instante, pues aunque pequeños, las boyas tienen movimientos horizontales.

A pesar de que, en general, las boyas miden correctamente, hay algunos efectos que son corregidos en el software de análisis de las medidas de oleaje. Por ejemplo, en la realidad las

⁵ Global Positioning System, GPS: Sistema de posicionamiento basado en la triangulación entre satélites dedicados a este fin.

crestas de las olas son ligeramente mayores que las medidas y los senos ligeramente más planos, con lo que las mediciones resultan ser más simétricas (respecto al nivel medio del mar) que en la realidad; además las boyas infraestiman los oleajes menores debido a su inercia y no llegan a reproducir correctamente las crestas de las olas muy apuntadas.

A pesar de estos pequeños inconvenientes, los registros de oleajes de las boyas son de una gran calidad, siendo muy utilizadas desde los años 70-80. Así, desde estas fechas se han ido implantando las primeras redes de boyas permanentes en distintas partes del mundo, generando las actuales bases de datos. La mayor es la del NDBC (*National Data Buoy Center*, www.ndbc.noaa.gov/), con boyas repartidas fundamentalmente por la costa este de EEUU en el Océano Atlántico y en el Pacífico Norte. Existen otras redes como la de Japón (*Japan Meteorological Agency*, JMA), la de India (*Indian National Data Buoy Programme*, NDBP) o la de Canadá (*Canadian Marine Environmental Data Service*, CMEDS); en Europa las redes más importantes son las de Reino Unido (*United Kingdom Met Office*), Francia (*Meteo France*), España (Organismo Público Puertos del Estado, OPPE), Italia (IDROMARE) o Grecia (*Hellenic National Oceanographic Data Center*, HNODC). También son importantes las redes de plataformas petrolíferas como las existentes en el Mar del Norte y Noruega.

Las distintas redes tienen boyas escalares o direccionales y pueden estar o no fondeadas en profundidades indefinidas. A pesar de que estas boyas suministran información de contrastada calidad, las series de datos presentan huecos (por avería o mantenimiento), están irregularmente repartidas por las áreas costeras y no suelen suministrar información de más de 15-20 años.

A continuación se va a explicar con más detalle las redes de boyas del OPPE (http://www.puertos.es/es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida), por ser las que se han utilizado en esta tesis. Desde la página web de OPPE se puede acceder a las boyas que gestiona la Generalitat de Cataluña en la zona costera catalana y el IEO (Instituto Español de Oceanografía) al Norte de Santander.

La red de boyas del OPPE cubre la totalidad del litoral español, la península Ibérica, los dos archipiélagos (Baleares y Canarias), Ceuta y Melilla. Dicha red está subdividida en otras dos redes, la red de boyas de aguas profundas y la red costera. En la figura 2.15 se puede ver la ubicación de todas las boyas que actualmente mantiene el OPPE en sus dos redes (en total aglutinan 38 boyas). También existe una serie de boyas que realizan labores de apoyo portuario o campañas específicas, pero que no constituyen propiamente una red, pues no son boyas permanentes.

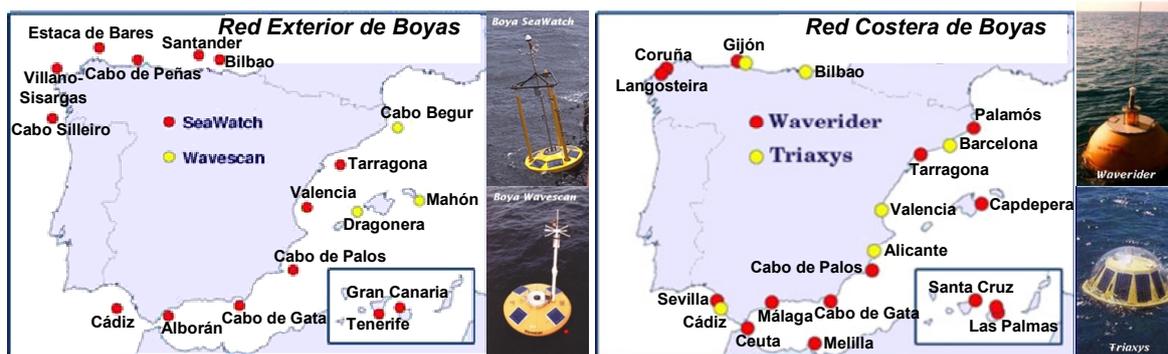


Figura 2.15. Boyas de las redes exterior y costera del OPPE.

	Profundidad Fondeo [m]	Periodo Fondeo	Posición [° N; ° E]	Tipo
Bilbao	600	11/1999-...	43.64; -3.05	Direccional
Santander	2500	06/2007-...	43.85; -3.77	Direccional
Cabo de Peñas	450	06/1997-...	43.74; -6.17	Direccional
Estaca de Bares	380	07/1996-...	44.06; -7.62	Direccional desde 01/1997
Villano-Sisargas	390	05/1998-...	43.50; -9.21	Direccional
Cabo Silleiro	320	07/1998-...	42.13; -9.39	Direccional desde 06/2003
Cádiz	450	08/1996-...	36.48; -6.97	Direccional desde 05/2003
Alborán	580	02/1997-02/2006	36.25; -5.03	Direccional desde 04/2003
Cabo de Gata	530	03/1998-...	36.57; -2.34	Direccional desde 04/2003
Cabo de Palos	230	07/2006-...	37.65; -0.33	Direccional
Valencia	260	09/2005-...	39.52; 0.21	Direccional
Tarragona	670	08/2004-...	40.68; 1.47	Direccional
Cabo Begur	1200	03/2001-...	41.92; 3.66	Direccional
Mahón	300	04/1993-...	39.72; 4.44	Direccional
Dragonera	135	11/2006-...	39.56; 2.10	Direccional
Gran Canaria	780	06/1997-...	28.20; -15.80	Direccional desde 05/2003
Tenerife	710	04/1998-...	28.00; -16.58	Direccional desde 05/2003

Tabla 2.1. Relación de boyas de la red exterior del OPPE.

La red de aguas profundas está formada por 14 boyas Seawatch y 3 Wavescan. Los instrumentos están ubicados en puntos con profundidades mayores de 200 metros y mandan los datos medidos en tiempo real vía satélite. Actualmente (desde el año 2003) todas las boyas de esta red son direccionales. En la tabla 2.1 se presentan la profundidad a la que están fondeadas, el periodo de tiempo que llevan fondeadas, la posición y el tipo de todas las boyas de que dispone la base de datos de la red exterior del OPPE.

La red costera se caracteriza por tener boyas ubicadas en las proximidades de instalaciones portuarias, por lo que envían los datos medidos en tiempo real por radio. En la mayoría de los casos, las medidas están perturbadas tanto por el perfil de la costa, como por los efectos del fondo marino sobre el oleaje, pues están fondeadas a menos de 100 metros de profundidad. La

red costera cuenta con los registros de oleaje más largos de España, la boya que cuenta con la serie temporal más larga tiene aproximadamente 25 años de datos. Dicha red consta de 12 boyas escalares Waverider, 3 boyas direccionales Waverider y de 6 boyas direccionales Triaxys.

En la tabla 2.2 se presentan la profundidad a la que están fondeadas, el periodo de tiempo en que han estado en funcionamiento, la posición y el tipo de todas las boyas de que dispone la base de datos de la red costera del OPPE.

	Profundidad Fondeo [m]	Periodo Fondeo	Posición [° N; ° E]	Tipo
Bilbao	50	02/1985-...	43.40; -3.14	Direccional desde 02/2004
Gijón Uno	23	01/1981-11/2002	43.57; -5.65	Escalar
Gijón Dos	43	03/1994-...	43.61; -5.67	Escalar
Cost-Gijón	54	02/2001-...	43.62; -5.67	Direccional
Coruña	50	07/1982-...	43.41; -8.38	Escalar
Langosteira	40	05/1998-...	43.36; -8.53	Direccional
Silleiro	70	02/1991-10/2006	42.10; -8.92	Escalar
Sevilla	10	02/1983-...	36.74; -6.48	Escalar
Cádiz	22	01/1983-...	36.50; -6.33	Direccional desde 07/2001
Algeciras	84	11/1993-03/2006	36.16; -5.39	Escalar
Cost-Algeciras	55	03/2004-07/2005	36.08; -5.42	Direccional
Ceuta	21	01/1985-...	35.90; -5.33	Escalar
Melilla	15	04/2008-...	35.32; -2.94	Escalar
Málaga	22	11/1985-...	36.67; -4.43	Escalar
Cabo de Gata	35	04/1991-...	36.71; -2.20	Escalar
Cabo de Palos	67	11/1985-...	37.65; -0.64	Escalar
Alicante	50	09/1985-...	38.25; -0.42	Direccional desde 11/2006
Valencia	20	09/1985-06/2005	39.47; -0.28	Direccional desde 03/2004
Cost-Valencia	48	06/2005-...	39.52; -0.21	Direccional
Tarragona	24	11/1992-...	41.07; 1.19	Escalar
Barcelona Sur	30	10/2003-11/2006	41.29; 2.15	Escalar
Cost-Barcelona	68	03/2004-10/2007	41.32; 2.21	Direccional
Palamós	90	04/1985-...	41.83; 3.19	Escalar
Capdepera	46	05/1985-...	39.65; 3.49	Escalar
Las Palmas	42	06/1982-...	28.14; -15.46	Escalar
Las Palmas Este	48	02/1992-...	28.07; -15.40	Escalar
Tenerife	52	02/1981-03/2007	28.45; -16.25	Escalar
Santa Cruz	60	11/2006-...	28.47; -16.24	Escalar

Tabla 2.2. Relación de boyas de la red costera del OPPE.

Para ilustrar los datos de oleaje que se recopilan en la base de datos de las boyas del OPPE, se han dibujado en la figura 2.16 las series temporales de H_s (altura de ola significativa) y θ (dirección media de procedencia del oleaje) de 5 boyas de la red exterior y 4 de la red costera: una del archipiélago Canario (Tenerife, Red Costera); otra del archipiélago Balear (Mahón,

Red Exterior); otras dos en el mar Mediterráneo, en el mismo tramo de costa (Cabo de Gata, Red Exterior y Red Costera); otras dos en el océano Atlántico, en el Golfo de Cádiz (Cádiz, Red Exterior y Red Costera) y otras tres en el océano Atlántico, dos de ellas en las costas Gallegas (Villano-Sisargas, Red Exterior y Coruña, Red Costera) y otra en el mar Cantábrico (Bilbao, Red Exterior).

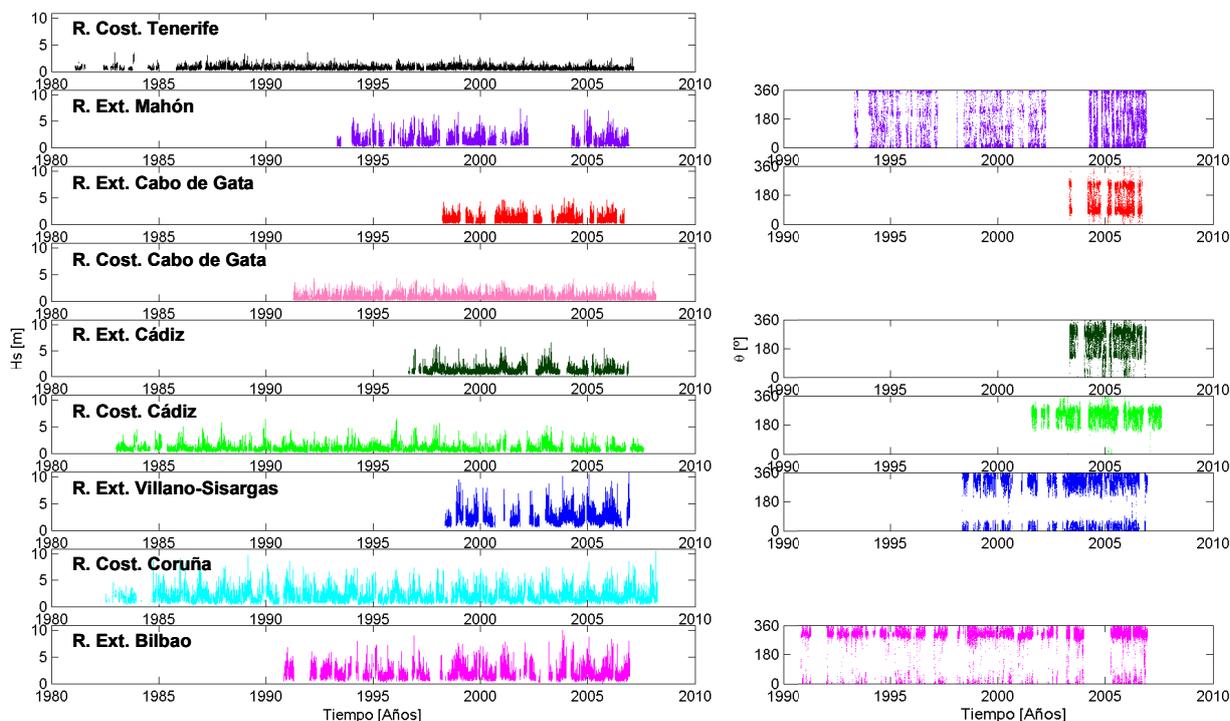


Figura 2.16. Altura de ola significativa (izquierda) y dirección media (derecha) de algunas boyas del OPPE.

Nótese en la figura 2.16 la presencia de huecos en las series, así como que cada una tiene una longitud distinta. Se puede ver que no todas las boyas de la red costera miden la dirección del oleaje y que las de la red exterior determinan la dirección al menos desde el año 2003, siendo casi siempre de mayor longitud los registros escalares que los direccionales (véase como la escala temporal de H_s va desde el año 1980 hasta el 2010 y en cambio la de θ empieza en 1990). Se puede comprobar como el oleaje es más energético en el Atlántico que en el Mediterráneo, en cambio el Mediterráneo tiene una mayor variación direccional (ver en la red Exterior Mahón y Cabo de Gata del Mediterráneo frente a Villano-Sisargas y Bilbao del Atlántico). También se puede verificar como disminuye la magnitud del oleaje y varía su dirección al propagarse hacia aguas someras; por ejemplo, comparando los registros de boyas de la red costera con los de la red exterior, cuando se tienen boyas de ambas redes situadas en el mismo tramo de costa (como las dos de Cabo de Gata, las dos de Cádiz o la de Villano-Sisargas y la de Coruña).

2.4.4. Datos de satélites.

La única fuente de información instrumental que permite dar información global de oleaje es la procedente de los satélites, que de forma remota (con órbitas del orden de los 1000 km por encima de la superficie terrestre) consiguen determinar parámetros del oleaje como H_s , con errores similares a los de las boyas (Caires y Sterl, 2003). Los satélites pueden llevar distintos instrumentos, pero básicamente son tres los que miden parámetros oceanográficos: los altímetros de radar (RA, *Radar Altimeter*) que miden el nivel del mar y la altura de ola significativa, los radares de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*) que aunque aún se sigue investigando en esta tecnología consiguen espectros direccionales de oleaje y los *Wind Scatterometer* que miden intensidad y dirección del viento.

Se va a explicar únicamente los satélites con altímetros de radar a bordo, pues son los que actualmente mejor determinan H_s e históricamente más tiempo llevan usándose, teniendo sus bases de datos una contrastada calidad. Aunque existen misiones de satélites con altímetros a bordo desde los años 70 (ver tabla 2.3), no es hasta los años 80 que los datos de altura de ola tienen suficiente calidad; esto es debido fundamentalmente a la mejor precisión con que se determina la posición (órbita) de los satélites (ver figura 2.17).

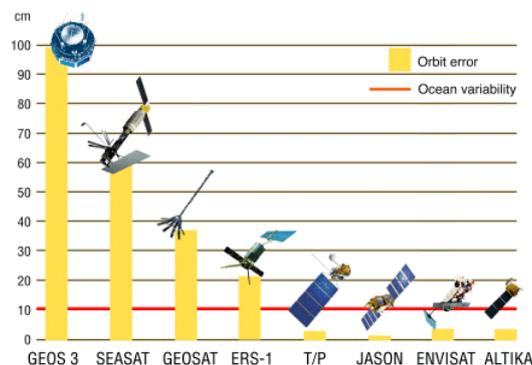


Figura 2.17. Evolución de la precisión con que las primeras misiones determinaban su posición (CNES, *Centre National d'Etudes Spatiales*, tomado de <http://www.aviso.oceanobs.com/>).

Así, actualmente se utilizan sistemas de localización para determinar la posición exacta del satélite en cada instante con instrumentos complementarios como el GPS, sistemas láser o de efecto doppler. El principal propósito de los altímetros de radar es medir la elevación de la superficie del mar, pues mandan pulsos de potencia conocida y miden el tiempo que tarda en retornar el pulso reflejado. Las distintas misiones de satélites que llevan RA mandan un pulso aproximadamente cada segundo, lo que suele suponer una separación entre un dato con el anterior (en la traza) de entre 5-7 km. Dichos radares emiten en la banda K_u , aunque generalmente son duales, emitiendo en la banda C o incluso en la S para determinar con precisión la composición de la atmósfera. Así, a partir de las características del medio por el

que se transmiten los pulsos y el tiempo que el pulso emplea en atravesarlo se calcula la distancia entre el satélite y el mar y con ello se determina la posición de la superficie del mar. Pero también se puede medir la velocidad del viento cerca de la superficie del mar y la altura de ola significativa con la potencia y la forma del pulso reflejado, respectivamente.

La potencia del pulso reflejado se expresa como σ_0 (*Normalized Radar Cross Section*) y es proporcional a la porción de potencia recibida y transmitida del área iluminada por el pulso. También es sabido que σ_0 es inversamente proporcional a la velocidad del viento, por ello la velocidad del viento se calcula a partir de relaciones con σ_0 .

En la figura 2.18 se representa la relación entre H_s y la pendiente de la evolución temporal de la potencia del pulso reflejado (α). La potencia de la señal es proporcional al área iluminada por el pulso (también denominada huella o *footprint*) y como se ve en esta figura, la huella es función del tiempo. La huella en forma de círculo va aumentando hasta que se convierte en un anillo de área inicialmente constante. Nótese que si hay oleaje, la rugosidad de la superficie del mar es mayor, por eso α depende inversamente de la altura de ola significativa (siendo constantes τ la duración del pulso y c su celeridad); así que si el mar está en calma, la pendiente α es mayor.

A pesar de que teóricamente los datos medidos de H_s por los altímetros no necesitan ninguna corrección, en la práctica es necesario realizar calibraciones empíricas para eliminar errores sistemáticos de los altímetros (en la tabla 3.6 del capítulo 3 se mostrarán ejemplos de ello).

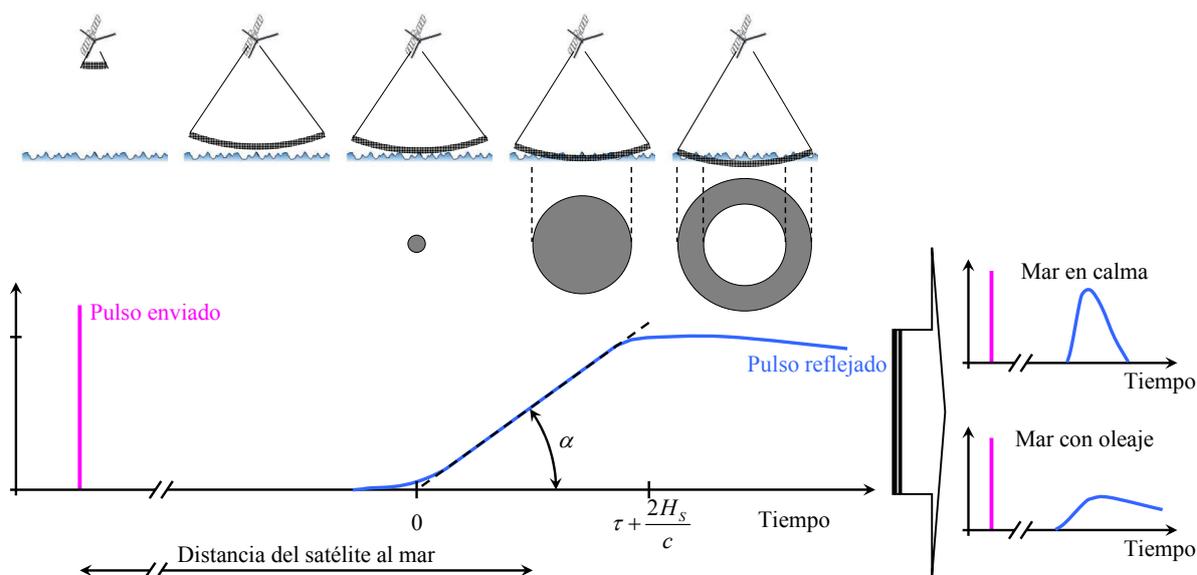


Figura 2.18. Representación esquemática de la forma de estimar H_s por altímetros (recopilada de Chelton (1988) y Holthuijsen (2007)).

Además de los datos de altura de ola, se puede correlacionar a partir de la información suministrada por los altímetros, datos del periodo de oleaje. Existen dos aproximaciones al problema (Fu y Cazedane, 2001). La primera aproximación al tema fue realizada por Carter *et al.* (1992), que posteriormente siguió Davies *et al.* (1998) formulando las primeras relaciones de T_m a partir de relaciones empíricas de datos de boyas con la variable P^6 , que es una relación teórica proporcional al periodo del oleaje, ligando H_s y σ_0 , tomadas por los satélites, de la forma:

$$P = (\sigma_0 H_s^2)^{1/4} \quad (2.15)$$

La otra aproximación fue debida a Hwang *et al.* (1998) que propuso relaciones de T_m y T_p a partir de la relación teórica de altura de ola e intensidad de viento para espectros saturados tipo *sea*.

A partir de la definición de la variable P (ver ecuación 2.15), ésta se ha relacionado empíricamente con parámetros que definen el periodo del oleaje (T_m o T_p). En la tabla 3.7 del capítulo 3 se pueden ver distintas relaciones de calibración. Cabe señalar que la determinación de parámetros que definen el periodo de oleaje con datos de satélites (mediante las relaciones de calibración actuales) aún no llegan a las precisiones logradas para H_s de los altímetros y son bastante particulares para la zona concreta para la que han sido calibradas.

Una vez explicada, de forma general, la forma de obtener parámetros como H_s o T_m de la información suministrada por los altímetros, se presentan las misiones que han llevado altímetros de radar hasta la actualidad. En la tabla 2.3 se presenta la duración de la misión, el tiempo que tarda en volver a sobrepasar el mismo sitio (ciclo) y la altura de la órbita a la que viaja. Cada misión tiene unas características diferentes, con unas trazadas distintas, pero hay tres que se han repetido para lograr continuidad en las bases de datos. La misión GEOSAT, de la *US Navy* (Marina EEUU) que han continuado con la GFO (*GEOSAT Follow-On*), las

⁶ Relación teórica de P : según la ecuación 2.15 y conociendo que σ_0 es inversamente proporcional al peralte medio cuadrático de las olas, siendo el peralte la altura de ola dividido entre la longitud de onda (L), se tiene:

$$P = (\sigma_0 H_s^2)^{1/4} \rightarrow P \propto \left(\left(\frac{1}{H/L} \right)^2 H_s^2 \right)^{1/4} \rightarrow P \propto \left(\left(\frac{L}{H} \right)^2 H_s^2 \right)^{1/4} \rightarrow P \propto \sqrt{L}$$

Según la relación de dispersión para profundidades indefinidas, la longitud de onda es proporcional al cuadrado del periodo del oleaje, con lo que la expresión anterior queda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \rightarrow P \propto \sqrt{\frac{gT^2}{2\pi}} \rightarrow P \propto T$$

misiones ERS-1, ERS-2 y ENVISAT de agencia espacial europea (ESA, *European Space Agency*) y las misiones que han desarrollado de manera conjunta la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*) que son TOPEX/POSEIDON (T/P), JASON-1 y JASON-2.

	Duración	Ciclo	Órbita	
SKYLAB	1973			1º en llevar altímetro
GEOS-3	1975-1978			1º en producir datos
SEASAT	1978			Primeros datos útiles
GEOSAT	1985-1990	17 días	800 km	
ERS-1	1991-2000	35 días	785 km	
TOPEX/POSEIDON	1992-2006	10 días	1336 km	13 años de datos
ERS-2	1995-...	35 días	785 km	Continúa ERS-1
GFO	1998-...	17 días	800 km	Continúa GEOSAT
JASON-1	2001-...	10 días	1336 km	Continúa T/P
ENVISAT	2002-...	35 días	800 km	Continúa ERS-1 y 2
JASON-2	2008-...	10 días	1336 km	Continúa T/P y JASON-1

Tabla 2.3. Características de las diferentes misiones de satélites con altímetros hasta la actualidad.

Existen multitud de organismos que distribuyen los datos de altímetros, por ejemplo a través de AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com>), que también da una detallada descripción de las distintas misiones. Otra dirección interesante es la correspondiente al PO.DAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*, <http://podaac.jpl.nasa.gov>). En la figura 2.19 se presenta la distribución espacial de diversas bases de datos de satélites a lo largo del Atlántico Norte y el Mediterráneo.

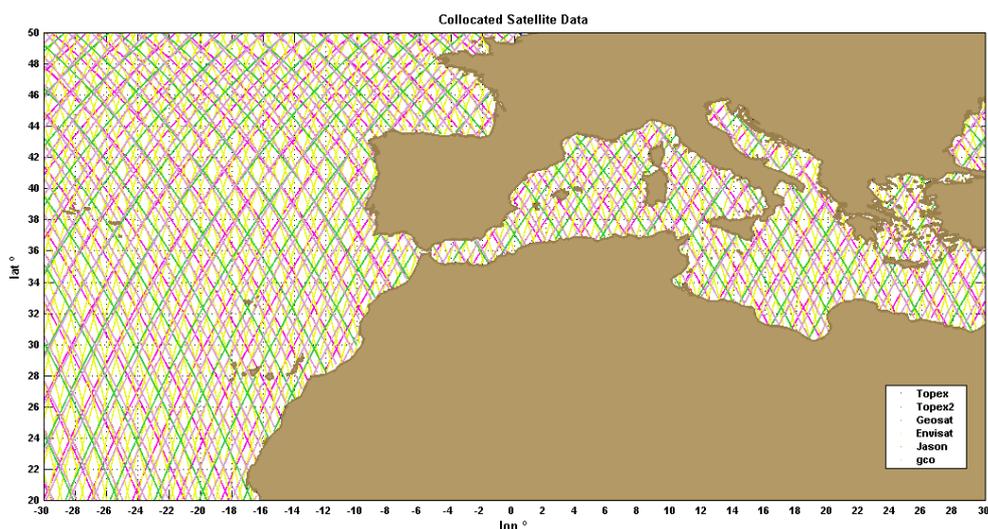


Figura 2.19. Distribución espacial de diversas bases de datos de satélites.

Finalmente en la figura 2.20 se presentan los primeros datos medidos de H_s por la última misión lanzada, el JASON-2. Puede comprobarse como se recopila la información del oleaje

de todo el globo. En este ejemplo, de finales de junio del 2008 es invierno en el hemisferio sur.

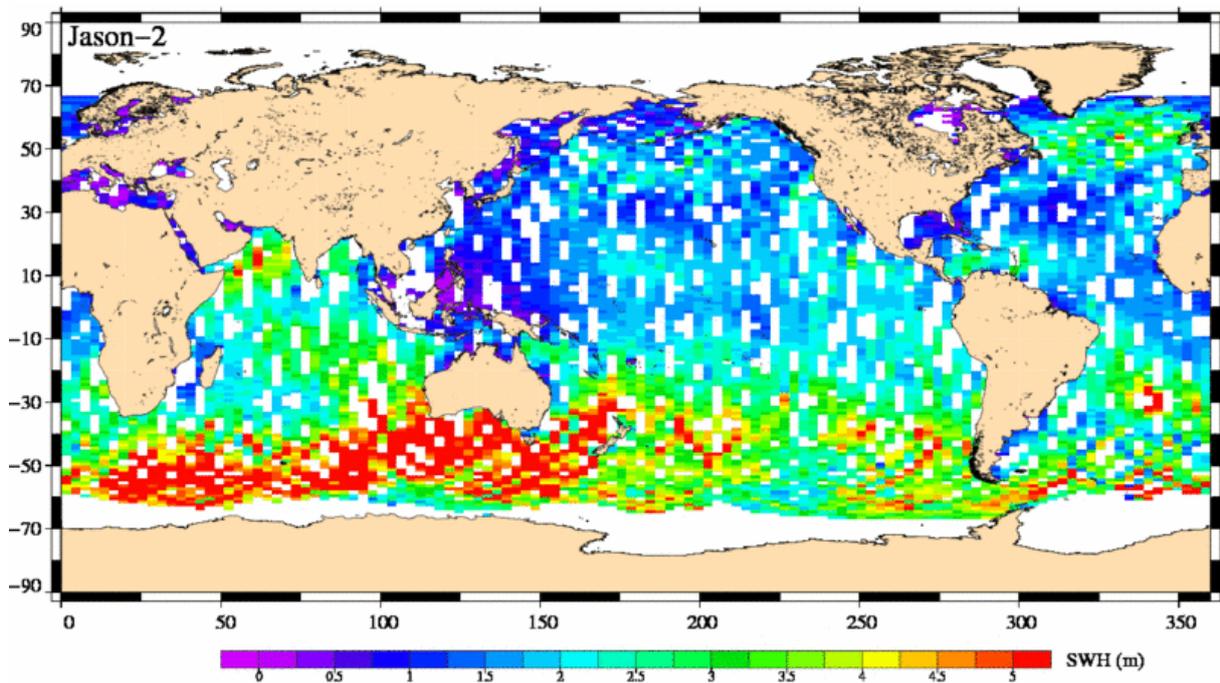


Figura 2.20. Datos de altura de ola significante (25/06/2008-30/06/2008) del JASON-2 (CNES).

2.4.5. Datos de modelado numérico.

Los datos de modelado numérico provienen de simulaciones numéricas que calculan el espectro direccional del oleaje (con información de mar de viento, tipo *sea* y de mar de fondo, tipo *swell*) a partir de unas condiciones meteorológicas durante un periodo de tiempo. Cuando las condiciones meteorológicas son pasadas se producen las denominadas bases de datos de reanálisis (*hindcast* o *reanalysis*). Debe tenerse en cuenta que estas bases de datos provienen de modelos matemáticos (no son observaciones o mediciones del mar), por lo que deben ser validadas/calibradas con información instrumental de oleaje (ver los procedimientos de calibración existentes en el epígrafe 3.3.3 del capítulo 3). En la figura 2.21 se representa la simulación numérica instantánea de un temporal en el Mediterráneo. En dicha figura se representa la altura de ola y la dirección media de la componente de mar de viento (flecha verde) y de mar de fondo (flecha blanca).

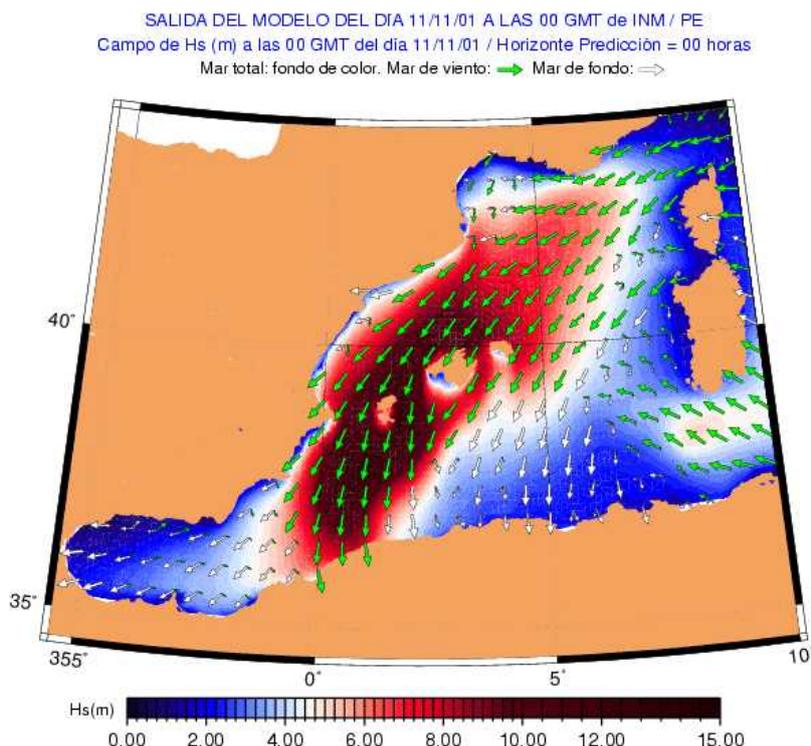


Figura 2.21. Distribución espacial del oleaje tipo *sea* y *swell* simulados para un temporal del Mediterráneo (AEMET/OPPE, Agencia Estatal de Meteorología / Organismo Público Puertos del Estado, tomado de <http://www.puertos.es/>).

Históricamente, aunque han existido modelos numéricos desde la segunda mitad del siglo XX, no es hasta los años 70 que se ejecutan los primeros modelos a escala global, debido en gran medida al desarrollo computacional logrado. Por ello, únicamente dos importantes centros produjeron las primeras bases de datos de oleaje de reanálisis globales, el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) y el NCEP/NCAR (*the American National Center for Environmental Prediction and for Atmospheric Research*).

Uno de los primeros reanálisis globales de oleaje se ejecutó en 1979, y se denominó FGGE, *First GARP Global Experiment*, del ECMWF. Por su parte, el NCEP/NCAR, simuló el primer reanálisis global de oleaje de 40 años de duración (desde 1958 hasta 1997) con un modelo espectral de generación de oleaje de segunda⁷ generación, el ODGP2 (Cox y Swail, 2001), con una resolución espacial de 1.25° x 2.5° (latitud/longitud).

Desde los años 90 se utilizan varios modelos que han mejorado la calidad de sus resultados de forma notable. Los dos modelos de tercera generación más extendidos y utilizados son el

⁷ Modelo espectral de generación de oleaje de segunda/tercera generación: La diferencia fundamental entre modelos de segunda y tercera generación es que los de segunda generación parametrizan las interacciones no lineales del oleaje en función de la forma del espectro y los de tercera generación no lo necesitan.

WaveWatch III (Tolman, 1999; Tolman, 2001) y el modelo WAM (WAMDI Group, 1988; Janssen, 2004), que han ido mejorando respectivamente sus versiones.

Así, en la actualidad, existen multitud de implementaciones de modelos de oleaje a escala global. El ECMWF utiliza el WAM para sus ejecuciones, con él ha creado varias bases de datos de reanálisis de oleaje. En 1995 se terminó la base de datos del ERA-15 (Sterl *et al.*, 1998) que simula 15 años (1979-1993). En 2002 se acabó el reanálisis de más de 40 años (1957-2002) ERA-40 (Uppala, 2001 y Caires *et al.*, 2002), con asimilación de datos de satélites (ERS-1 y ERS-2) y con una resolución espacial de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ y temporal de 6 horas. En la actualidad se trabaja en otra versión más homogénea y dirigida a las predicciones de oleaje, el ERA-Interim (1989-...).

También existen infinidad de modelos regionales anidados a los modelos globales. Así por ejemplo a nivel europeo, dentro del proyecto WASA (*Waves and Storms in the North Atlantic*, Günther *et al.*, 1998) se ejecutó el modelo WAM desde 1955 hasta 1994 para el Atlántico Norte con una resolución espacial máxima de $0.5^\circ \times 0.75^\circ$ (latitud/longitud). Posteriormente NCEP/NCAR también ejecutó para el Atlántico Norte, a partir de refinamientos en su reanálisis atmosférico, el modelo de tercera generación de oleaje OWI 3-G (Swail y Cox, 2000) con resolución espacial de $0.625^\circ \times 0.833^\circ$ (latitud/longitud), desde 1957 hasta 1997.

En España desde 1996, el OPPE realiza predicciones diarias de oleaje a lo largo de todas las costas españolas, utilizando el modelo WAM a partir de campos de viento que le suministra el INM. Con la recopilación de los datos de diagnóstico o analizados (no las predicciones) se va generando la base de datos WANA, que aunque ha utilizado distintas versiones del modelo numérico WAM, son continuas desde 1996 hasta la actualidad; las series WANA tienen una resolución espacial de 3 horas y cuentan con una resolución espacial de 0.25° en el Atlántico y 0.125° en el Mediterráneo.

En el modelado numérico del oleaje las resoluciones espaciales y temporales van ligadas. Así, para obtener mayor definición espacial de los procesos locales (tormentas) se debe aumentar también la resolución temporal. Como se ha visto, los modelos globales tienen menores resoluciones que los regionales. Si se sigue aumentando la resolución, se tienen los modelos mesoscales. Por otro lado, es importante resaltar que los modelos de oleaje de reanálisis globales y regionales descritos (por ejemplo WAM y WaveWatch III) son especialmente útiles en aguas profundas debido a su resolución espacial. Para el modelado del oleaje en aguas costeras donde el oleaje está afectado por el fondo son necesarios otros modelos, como por ejemplo el modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999; Booij *et al.*, 2004).

Ejemplos de reanálisis a escala regional/mesoscalar en las costas europeas se han realizado dentro del proyecto HIPOCAS (*Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe*; Guedes Soares *et al.*, 2002; Guedes Soares, 2008) que ha dado valiosos resultados (homogéneos, de altas resoluciones y de calidad). Con HIPOCAS se generan 44 años de reanálisis de oleaje homogéneo (1958-2001) con el modelo WAM ejecutado a altas resoluciones espaciales (5-10 km) y temporales (1-3 horas).

Hasta el momento, los datos de oleaje producidos por HIPOCAS en el Mediterráneo son los mejores datos de modelado numérico para las costas mediterráneas españolas (Ratsimandresy *et al.*, 2008). Debido a ello, el OPPE ha recopilado dichos datos del Mediterráneo y los ha agregado a un reanálisis propio del Atlántico, creando la base de datos SIMAR-44, que engloba todas las costas españolas.

En la figura 2.22 se describen las mallas y resoluciones de la base de datos SIMAR-44 de OPPE, que por otra parte ha sido exhaustivamente utilizada en esta tesis. Estos datos contienen series de oleaje con los parámetros de estado de mar direccionales, desde 1958 hasta 2001. Los datos se han simulado mediante un modelo WAM de tercera generación con una cadencia horaria. La información sobre oleaje presenta una descomposición de mar de viento (*sea*) y mar de fondo (*swell*). Con el fin de describir situaciones con mares de fondo cruzados, el modelo considera la posibilidad de dos contribuciones de mar de fondo. El modelo WAM utilizado incluye efectos de refracción y asomeramiento. No obstante dada la resolución del modelo y las profundidades relativas consideradas, los efectos del fondo se pueden considerar despreciables. Por tanto, para su uso práctico, los datos de oleaje deben de interpretarse siempre como datos en profundidades indefinidas. Esta base de datos de oleaje proporciona resultados en nodos de mallas espaciales con diferentes resoluciones, separando la región Atlántica de la Mediterránea.

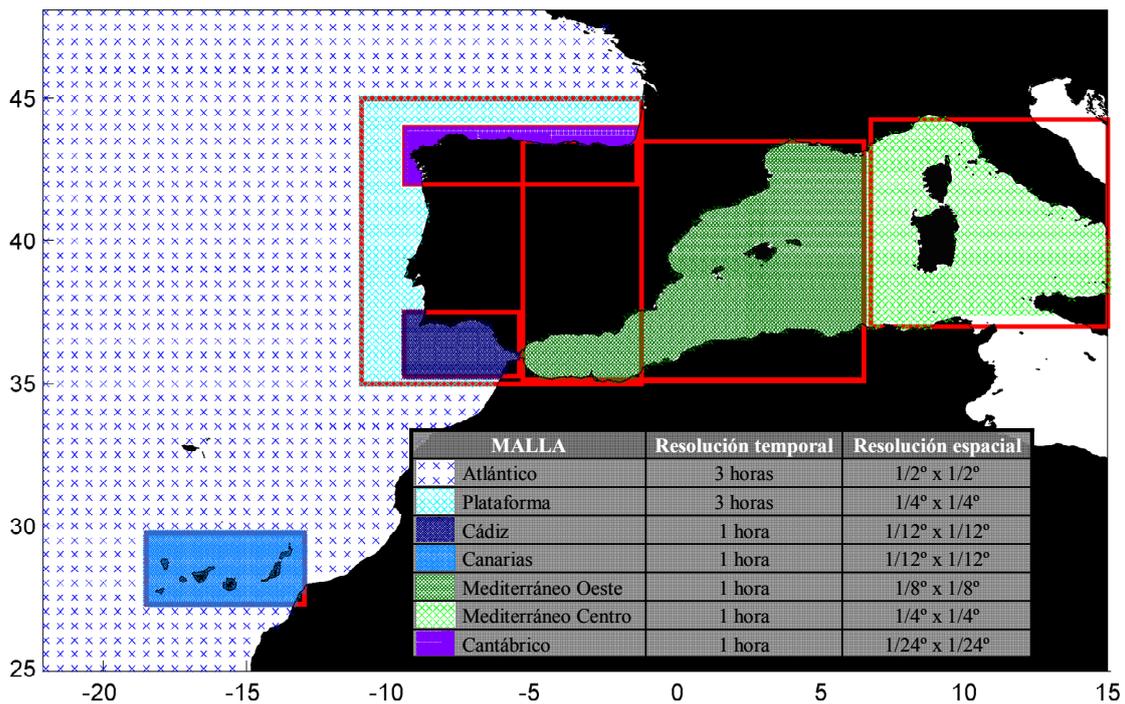


Figura 2.22. Representación de los nodos de oleaje de las distintas mallas de la base de datos SIMAR-44.

Finalmente se presentan varias figuras (2.23, 2.24 y 2.25) para ilustrar las características de la base de datos SIMAR-44, mostrando algunas series temporales de distintos parámetros de oleaje en las posiciones de algunas boyas. En concreto son las ubicaciones de las cinco boyas de la red Exterior que se representaron en la figura 2.16 (Mahón, Cabo de Gata, Cádiz, Villano-Sisargas y Bilbao), para poder así comparar las series simuladas numéricamente con las medidas por las boyas. Todas las series mostradas permiten verificar que las series de oleaje simulados son continuas y homogéneas (sin huecos ni quiebros) y de larga duración (44 años). Las apropiadas resoluciones espaciales de la base de datos SIMAR-44 permiten determinar el clima marítimo en cualquier posición de las costas españolas, por ejemplo en la ubicación de las 5 boyas presentadas.

De los distintos parámetros del estado de mar compuesto de oleaje que se recoge en la base de datos SIMAR-44 (H_s , T_m , T_p y θ) se representa la altura de ola significativa (H_s) en la figura 2.23 y su dirección media de procedencia (θ) en la figura 2.24. A la vista de ambas figuras se pueden resaltar las mismas características que las destacadas en la figura 2.16, con datos de boyas, pues las series de oleaje simulado y medido siguen los mismos patrones. Así se puede comprobar como el oleaje es más energético en el Atlántico (Bilbao, Villano-Sisargas y Cádiz) que en el Mediterráneo (Mahón y Cabo de Gata), siendo más marcada la estacionalidad invierno-verano en los datos de H_s del Atlántico.

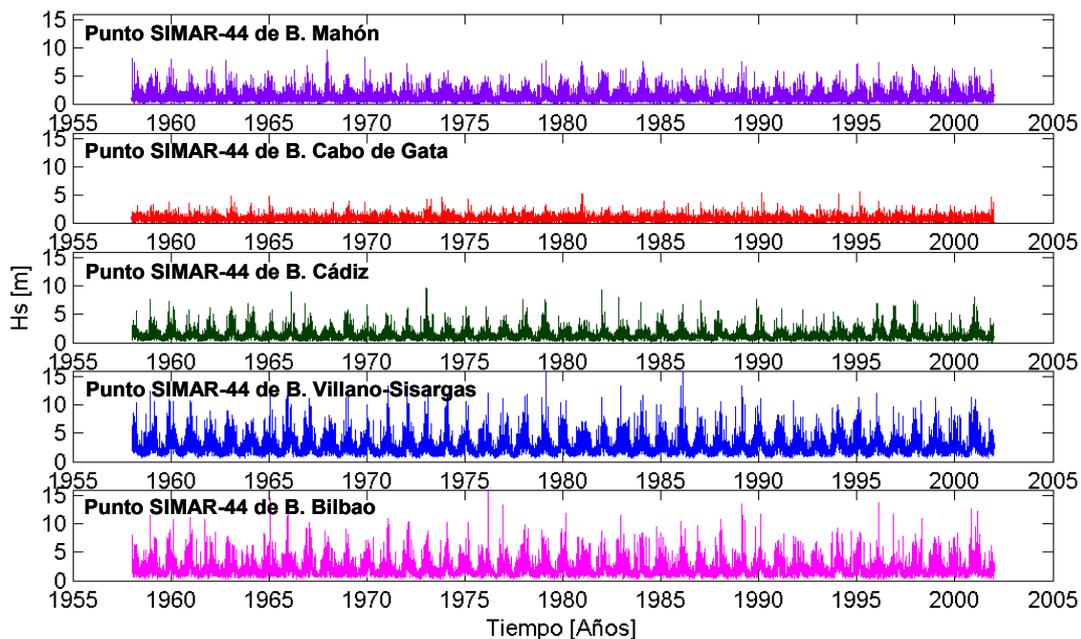


Figura 2.23. Altura de ola significativa de SIMAR-44 para la posición de algunas boyas exteriores del OPPE.

En cuanto a la direccionalidad del oleaje (ver figura 2.24) en el Atlántico los oleajes provienen mayoritariamente del cuadrante Noroeste; en cambio el Mediterráneo tiene una mayor variación direccional, en Mahón existen oleajes de todas las direcciones y en Cabo de Gata fundamentalmente de Levante (Este) y Poniente (Oeste). Cabe señalar que el criterio seguido para definir las direcciones es tomando el origen coincidente con el Norte ($\theta = 0^\circ$) y positivo en el sentido de las agujas del reloj.

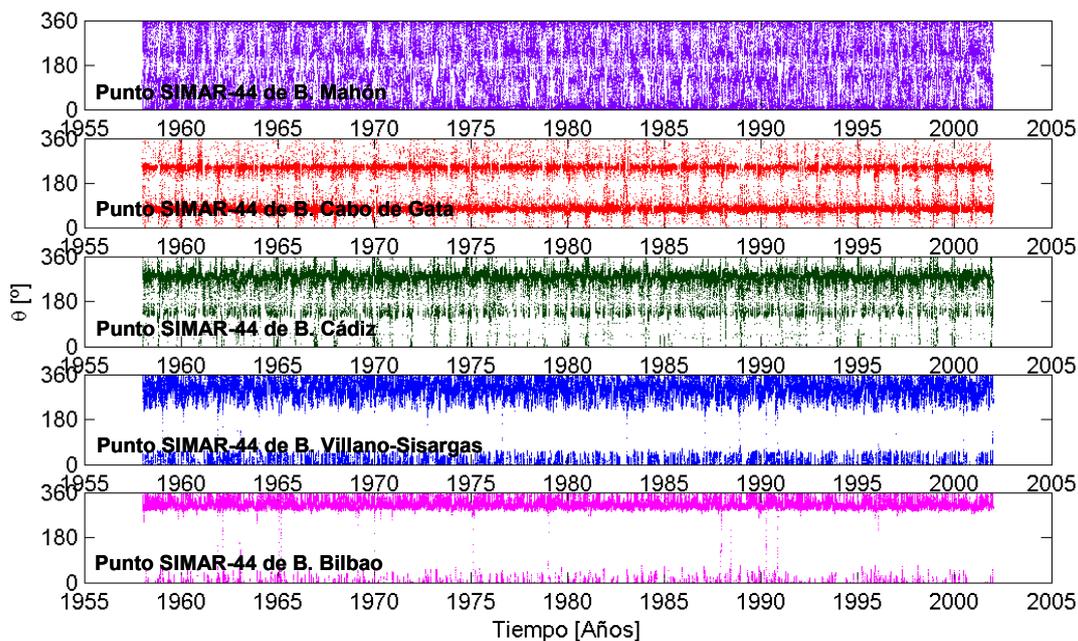


Figura 2.24. Dirección media del oleaje de SIMAR-44 para la posición de algunas boyas exteriores del OPPE.

En la base de datos SIMAR-44, además de los parámetros de mar compuesto, se caracterizan un *sea* y dos *swell* con H_s , T_m , y θ cada uno de ellos. Así en la figura 2.25 se representan varios parámetros de estado de mar que caracterizan distintas componentes del espectro direccional de oleaje ($H_{s\ sea}$, θ_{sea} , $H_{s\ swell\ 1}$ y $\theta_{swell\ 1}$). En líneas generales se puede observar que los oleajes *sea* son más energéticos que los *swell*, fundamentalmente en el Mediterráneo. En cuanto a las direcciones, en el Mediterráneo hay mucha variación direccional tanto en *sea* como en *swell*. Sin embargo, en el Atlántico los oleajes tipo *swell* provienen fundamentalmente de la dirección Noroeste, teniendo los *sea* una variación mayor.

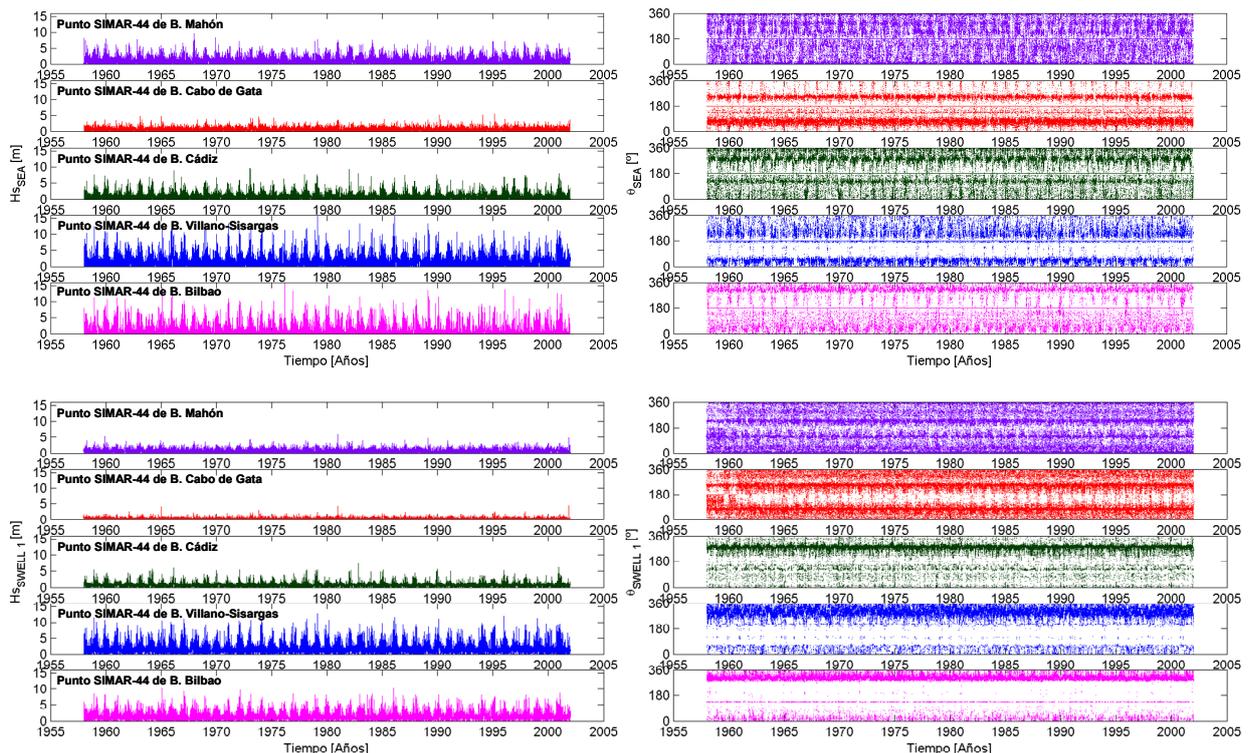


Figura 2.25. Oleaje *sea* y *swell* (H_s y θ) de SIMAR-44 para algunas boyas exteriores del OPPE.

Por último, se presenta en la figura 2.26 las series de altura de ola significativa de SIMAR-44 en la posición de las boyas de Mahón, Cabo de Gata, Cádiz, Villano-Sisargas y Bilbao, superponiendo (en color gris) los registros tomados por dichas boyas de la red Exterior. Se puede comprobar la continuidad de las series de SIMAR-44 desde el año 1958 hasta el año 2001, en cambio las boyas tienen series discontinuas desde los años 90 hasta la actualidad. También puede apuntarse que los datos coincidentes en tiempo y posición de ambas bases de datos son similares aunque no iguales, comprobándose la necesidad de calibrar las bases de datos de modelado numérico.

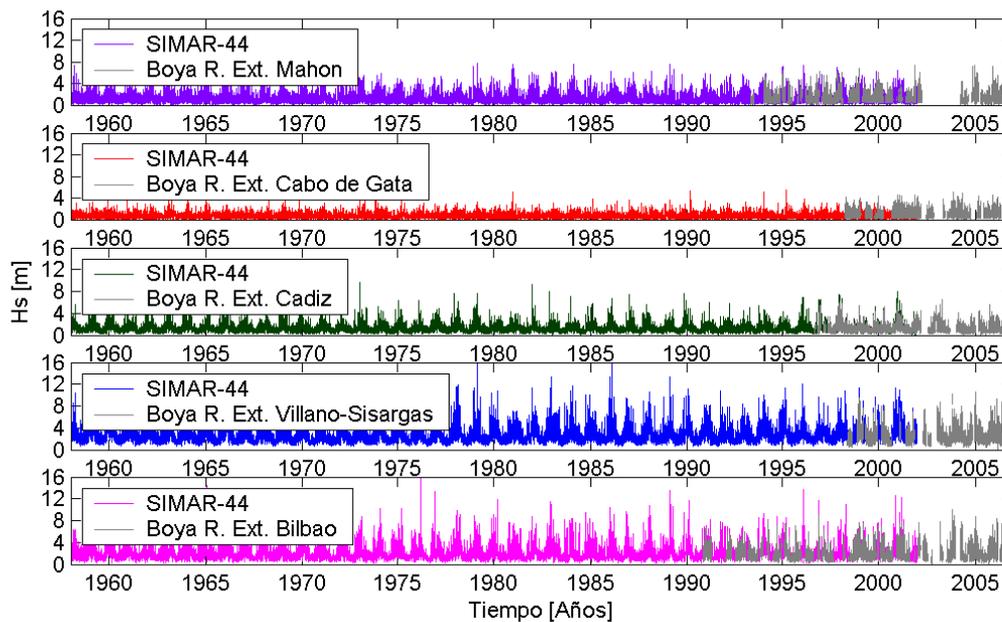


Figura 2.26. H_s de algunas boyas exteriores y de SIMAR-44 para la posición de dichas boyas.

2.5. Conclusiones.

Un resumen de las conclusiones a las que se ha llegado tras el estudio del estado de conocimiento de los datos de oleaje se presenta esquemáticamente en los siguientes puntos:

- Los parámetros que caracterizan el oleaje en un estado de mar que generalmente más se utilizan y calibran son la H_s y el T_m ; el T_p también, pero de forma más particular, pues es un parámetro espectral muy dependiente de la forma del espectro (poco robusto) y varía en función de las herramientas matemáticas utilizadas en su determinación.
- Las fuentes de información de datos de oleaje son: datos visuales, instrumentos de medida y datos de modelado numérico. Los datos visuales históricamente fueron los únicos disponibles; están distribuíos por las rutas marítimas de todo el globo y recogen una gran cantidad de información, siendo la más antigua fuente de información de oleaje, pero se desaconseja su uso para caracterizar el régimen extremal del oleaje, pues los barcos evitan las tormentas y dichos datos dependen del observador, por lo que necesitan ser calibrados con datos instrumentales. Los instrumentos de medida de oleaje son la segunda fuente de información. Estos datos son imprescindibles para caracterizar el oleaje y calibrar las otras fuentes de información. Existen muchos tipos de instrumentos para medir el oleaje. La última fuente de información son los datos de modelado numérico, que han tenido una gran repercusión desde su aparición, pues generan datos a una gran resolución temporal y espacial, son homogéneos y simulan el

oleaje de los mares de todo el globo por largos periodos de tiempo, pero necesitan ser calibrados con datos instrumentales.

- Existen numerosos instrumentos que pueden utilizarse para medir el oleaje; atendiendo a una primera clasificación de instrumentos *in situ* y remotos, dos son los instrumentos *in situ* que han tenido una mayor implantación, los barcos meteorológicos (fundamentalmente a mediados del siglo pasado) y las boyas (que proporcionan actualmente las bases de datos de mejor calidad). Desde los años 80 son muy importantes los datos de satélites que de forma remota dan una cobertura global de H_s , (también se obtienen otros parámetros de oleaje, aunque aún están en desarrollo), pero tienen errores sistemáticos que aunque del orden de los errores de las boyas, hacen necesaria su validación o calibración.
- En el ámbito costero español las únicas bases de datos instrumentales son las de los barcos meteorológicos, boyas y satélites. Especial repercusión e importancia tiene la red de boyas del OPPE, que cubre la totalidad de las costas españolas y presenta una configuración estable en el tiempo. Aunque existen también otros dispositivos de medición de oleaje, no forman verdaderas redes de medida, pues cuando registran el oleaje, lo hacen de forma esporádica, experimental o específica para unos fines concretos. A pesar de ello, si se dispone de dichos datos, tras evaluar su calidad, no se puede despreciar su uso para calibrar o caracterizar el oleaje.

