

Información Océano-meteorológica en el Mar Cantábrico:Boya AGL

D. Cano⁽¹⁾, R. Somavilla⁽¹⁾, J.L. Arteché⁽²⁾, C. Rodríguez⁽¹⁾ y A. Lavín⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto Español de Oceanografía. Santander. daniel.cano@st.ieo.es

⁽²⁾ Agencia Estatal de Meteorología. Santander. j.l.arteché@inm.es

1. Introducción

La variabilidad natural del clima terrestre abarca una amplia variedad de escalas de tiempo afectando a los distintos compartimentos tierra-mar-aire implicados en este complejo sistema. Es por ello que la separación del efecto antropogénico y la variabilidad natural del clima necesita de largas series de observación terrestres, atmosféricas y oceánicas. La observación del componente atmosférico del clima se viene llevando a cabo de forma sistemática desde hace ya dos siglos, de un modo científico, a través de estaciones meteorológicas, no así en el medio marino dada la dificultad intrínseca que conlleva la toma de datos en este medio.

Las series temporales de datos oceanográficos han sido llevadas a cabo tradicionalmente a través de muestreos desde barcos oceanográficos. Los avances en el conocimiento de la oceanografía han estado continuamente ligados a mejoras en la tecnología e instrumentación. Así, la mayoría de los programas de monitorización oceanográfica existentes han reforzado sus sistemas de observación a través del uso de boyas de deriva y fondeadas, satélites, sistemas en barcos de oportunidad (FerryBoxes) y modelado oceanográfico.

Al sur del Golfo de Vizcaya, en el meridiano de Santander una sección estándar está en funcionamiento desde 1991 como parte del programa de monitorización RADIALES (<http://www.seriestemporales-ieo.net>) del Instituto Español de Oceanografía (IEO) (Figura 1). Este programa muestrea desde barcos oceanográficos mensualmente las aguas sobre la plataforma continental rodeando la Península Ibérica midiendo básicamente su temperatura, salinidad y propiedades biogeoquímicas. El estudio de la variabilidad climática de las aguas oceánicas está también contemplado dentro de proyectos de investigación como VACLAN (<http://www.vaclan-ieo.es>). Siguiendo con la tendencia de intensificación de las series temporales de observación oceanográfica, una boya océano-meteorológica (boya AGL, http://www.boya_agl.st.ieo.es) equipada con un amplio conjunto de sensores atmosféricos, hidrográficos y biogeoquímicos fue fondeada en Junio de

2007 en la sección de Santander. Situada a 22 millas frente a Cabo Mayor, en la posición $43^{\circ}50,67'N$, $3^{\circ}46,20'W$ y a una profundidad de 2850 metros, proporciona una oportunidad única de estudio de los procesos de interacción atmósfera-oceano en aguas oceánicas del Golfo de Vizcaya, un campo donde hasta el momento existe escaso conocimiento [1], y la observación continua de la capa superficial del océano. Por otra parte, la colaboración con la Agencia Estatal de Meteorología (Delegación Territorial en Cantabria) ha permitido además aportar una visión sinóptica del acoplamiento de procesos meteorológicos y oceanográficos no recogidos por la boya AGL.

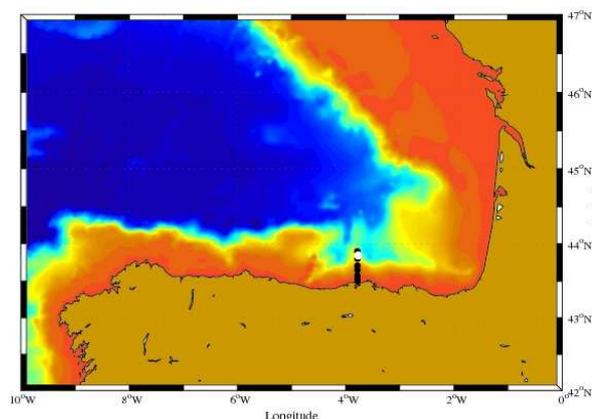


Figura 1: Sección estándar de Santander con las estaciones marcadas como puntos rojos y posición de la Boya Augusto González de Linares

Con todo, en este trabajo además de presentarse de modo general la serie temporal de datos meteorológicos y oceanográficos obtenidos por la boya AGL (Figura 3), se estudiarán algunos episodios especialmente destacables acontecidos desde su fondeo. Fenómenos meteorológicos dentro del ámbito de la mesoescala pueden ser estudiados gracias a la boya AGL: ubicada a unos cuarenta kilómetros de costa, facilita por vez primera la posibilidad de analizar la evolución del régimen de brisas costeras y su desarrollo espacial en el medio marino. Fuertes temporales unidos a eventos de oleaje extremo así como el acoplamiento de la variabilidad temporal de la temperatura del aire y la

temperatura superficial del mar a distintas escalas de tiempo serán abordados.

2. La Boya AGL y la sección estándar de Santander

En Junio de 2007, se fondeó en la sección estándar de Santander la Boya Océano-meteorológica Augusto González de Linares (Boya AGL, añadiendo desde ese instante una nueva estación en la sección, haciéndola coincidir con su posición. Es una boya de tipo Seawatch, con un diámetro total de 1,7m, 8,6m de longitud total y un peso de 710kg. Está equipada con una amplia cantidad de sensores atmosféricos, hidrológicos, oceanográficos y biogeoquímicos (Figura 2).

- Temperatura del aire
- Presión atmosférica
- Humedad relativa
- Dirección y velocidad del viento
- Temperatura del agua
- Conductividad
- Altura y dirección del oleaje
- ADCP (Acoustic Dopple Current Profiler) para la medición de corrientes en los 100 primeros metros de la columna de agua
- Oxígeno disuelto
- Clorofila

Se prevé además, la próxima instalación de un sensor de radiación.

Esta equipada con un GPS para monitorizar su posición, una unidad de procesado y almacenamiento y un módem satélite para la transferencia de datos. La alimentación de todo el conjunto se realiza a través de paneles solares. Cada hora el valor de 52 parámetros seleccionados es transmitido a través de satélite (INMARSAT-C o IRIDIUM) a la estación de tierra situada en el Centro del I.E.O. en Santander (Figura 3).

Los datos, una vez recibidos en la estación de tierra, se almacenan en el ordenador de recepción con el formato propio de los suministradores del hardware y software de comunicación con la boya (FUGRO-Oceanor) que funciona en un entorno Windows. Este equipo cuenta con apoyos de backup a disco y NAS¹.

Después comienza el procesado automático, que realiza varias tareas. Extrae los parámetros de interés de la base de datos original y los envía a un

¹Network Attached Storage: servidor de ficheros conectado a la red que solamente procesa peticiones de entrada/salida

segundo equipo, en este caso bajo GNU/Linux que los almacena y cambia a formato XML (Extensible Markup Language <http://www.w3c.org/XML>) compatible con el estándar ESEEO (Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional <http://www.eseeo.org>), para su envío a Puertos del Estado, en virtud del convenio existente entre estos y el IEO. Este equipo también recibe respaldo NAS.

De la base de datos original, también se extraen otra serie de parámetros de interés que son enviados a un tercer equipo, otro servidor GNU/Linux. En este equipo los datos se reformatean y se insertan de forma automática en una base de datos MySQL que puede ser consultada a través de la web de la boya. Al igual que los demás equipos también recibe respaldo NAS.

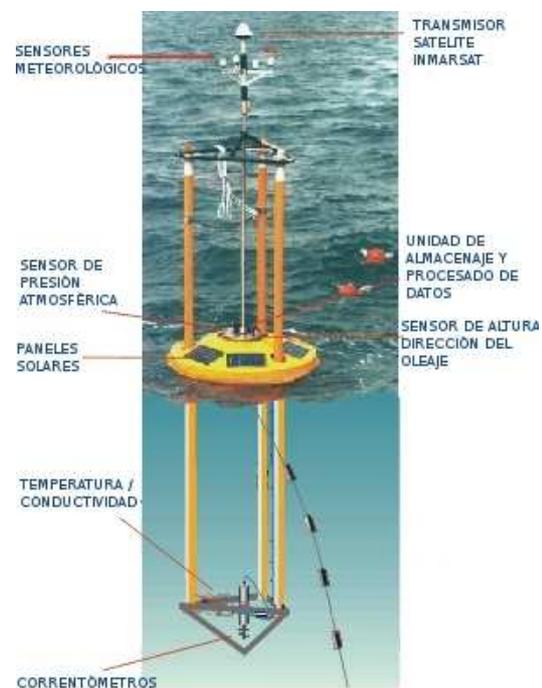


Figura 2: Esquema de la boya Augusto González de Linares y sus principales sensores.

Datos del centro de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en Santander, ayudarán a explicar las condiciones atmosféricas de los tres grandes temporales sufridos en la costa cantábrica desde el fondeo de la Boya. Estos temporales, han dado como resultado récords en los valores H_{max} y H_s , nunca antes registrados en aguas españolas.

3. Ciclos de temperatura en la boya AGL

La energía en forma de radiación solar que recibe la Tierra y su achatada forma determinan prácticamente la mayoría de procesos dinámicos en la atmósfera y

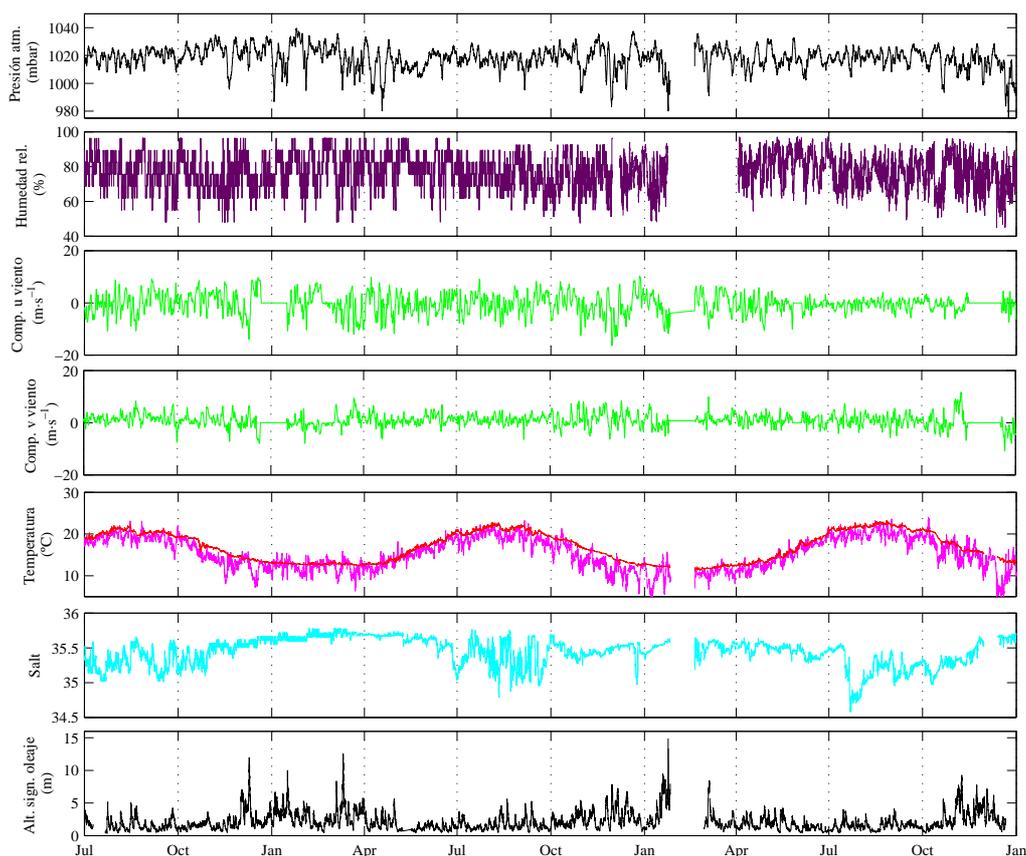


Figura 3: Varios parámetros son transmitidos de forma horaria al Centro del IEO en Santander, pudiendo elaborarse series temporales de todos los parámetros recibidos. En este caso están representadas, en orden descendente: presión a nivel del mar, humedad relativa, componentes u y v del viento, temperatura del aire, salinidad y altura significativa del oleaje desde su fecha de fondeo hasta finales de 2009

el océano. Debido a la alta capacidad calorífica del agua, y debido a que el océano ocupa dos terceras partes de la superficie terrestre, la mayoría de la radiación solar pasa a través de las capas superficiales del océano, desempeñando así un papel fundamental en el clima terrestre.

Los océanos ganan calor durante la primavera y verano perdiendo éste lentamente durante otoño e invierno. De modo similar, el calor ganado durante el día es liberado a la atmósfera durante la noche. Así, las capas superficiales actúan como un reservorio de calor en un amplio rango de escalas de tiempo. Todo ello hace que las variaciones de la temperatura del aire y la temperatura superficial del mar estén estrechamente relacionadas a través de los flujos de calor que ocurren en la interfase atmósfera-océano [2].

En la Figura 4a se muestra la serie temporal de temperatura del aire y del agua de la boya AGL desde su fondeo hasta Diciembre de 2009. La temperatura del aire se observa casi permanentemente por debajo de la temperatura superficial del mar, lo que provoca

que en la posición de esta boya en el Golfo de Vizcaya el océano esté cediendo calor a la atmósfera prácticamente durante todo el año a través de los conocidos como flujos de calor turbulentos (flujos de calor sensible y latente, [3]). Así, es la radiación solar quien determina que el flujo neto entre ambos compartimentos oscile en torno a cero (positivo en primavera-verano, negativo en otoño-invierno), y por tanto los marcados ciclos estacionales observados en la temperatura del aire y del agua [4].

Tres periodos con distintas condiciones meteorológicas han sido escogidos para mostrar las variaciones a más alta frecuencia de ambos parámetros (Figura 4b, c y d). Todos los intervalos se han tomado a partir de datos del Observatorio de Santander de AEMET y de imágenes del satélite METEOSAT. Los mostrados en las Figuras 4b y c corresponden al mes de Mayo en el que una termoclina superficial (zona con un marcado gradiente de temperatura, ver Figura 5) se ha desarrollado en la columna de agua, de modo que el calor inyectado desde la atmósfera debe calentar una fina capa de agua (alrededor de 20 metros, ver profundidad de la capa de mezcla en la Figura 5). Ello hace que un marcado ciclo diario se observe

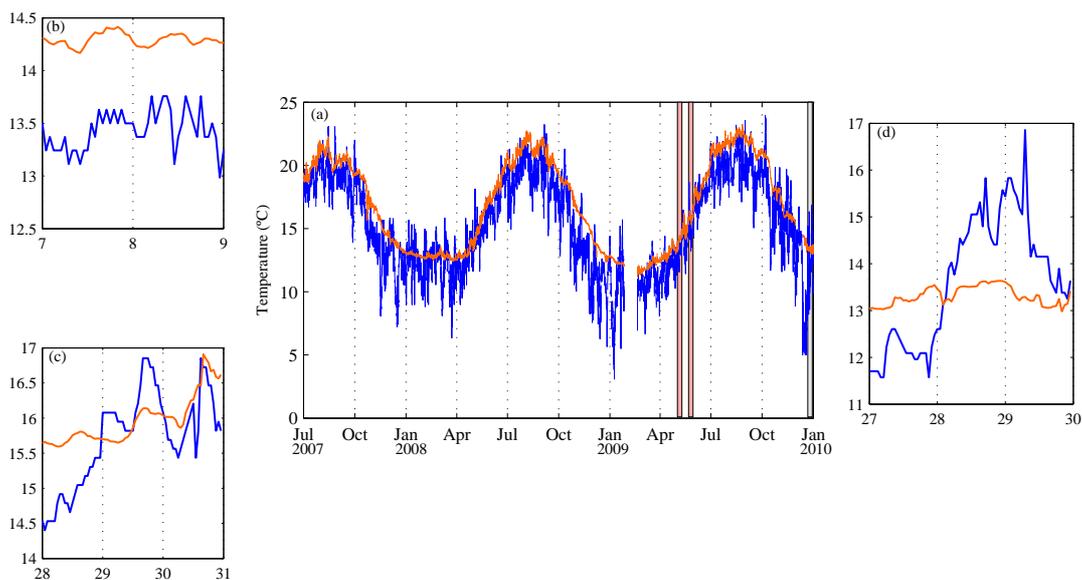


Figura 4: (a) Serie temporal de temperatura del aire (línea azul) y temperatura superficial del mar (línea naranja) desde el fondo de la Boya AGL hasta Diciembre de 2009. (b) Ídem para el periodo comprendido entre los días 7 al 9 de Mayo de 2009 (ciclo de días nublados); (c) del 28 al 30 de Mayo de 2009 (ciclo de días despejados); y (d) del 27 al 30 de Diciembre del mismo año (efecto Föhn).

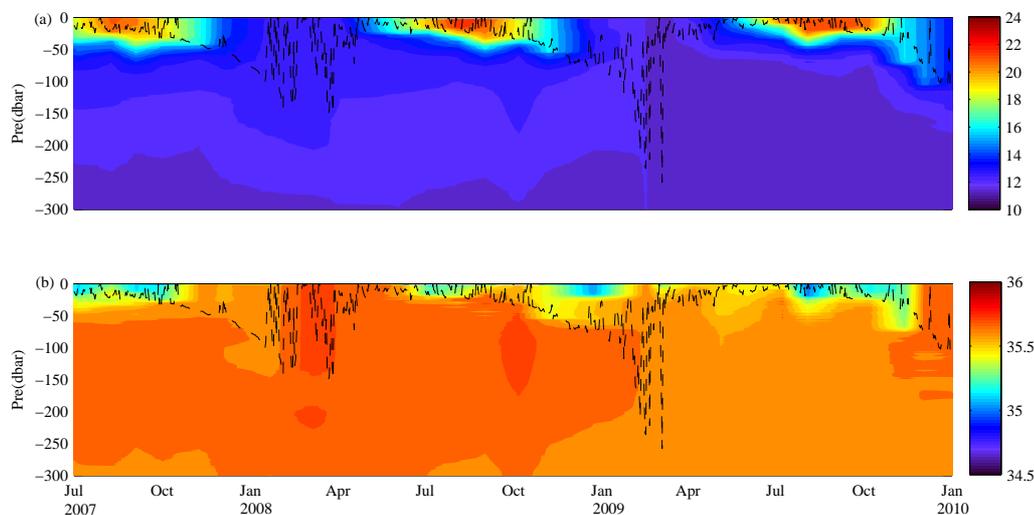


Figura 5: Evoluciones temporales de temperatura (a) y salinidad (b) en los primeros 300 metros de la columna de agua en la estación de la Boya AGL en el Radial de Santander. La línea negra en ambas Figuras señala la posición de la capa de mezcla estimada a partir del modelo GOTM [4]

tanto en temperatura del aire como en temperatura del agua para un ciclo de días despejados (Figura 4c). La variación máxima durante el periodo comprendido entre los días 28 al 30 de Mayo de 2008 fue de $0,65^{\circ}C$ para la temperatura del agua y de $2,45^{\circ}C$ en el caso del aire. Para un ciclo de días nublados en la misma época del año (del 7 al 9 de Mayo de

2009, Figura 4b) , sin embargo, la amplitud de estas oscilaciones se reduce notablemente (entre un 40 y un 50 %) tanto en la temperatura del aire ($1,29^{\circ}C$) como en la temperatura superficial del mar ($0,25^{\circ}C$).

En la Figura 4d se muestran los días 27, 28 y 29 de Diciembre de 2009, resultando un buen ejemplo de

consecuencia de viento racheado y recalentado por efecto Föhn al paso por la cordillera cantábrica. Se observa como a medida que el viento de componente Sur comienza a arreciar, la temperatura del aire va ascendiendo, siendo el efecto Föhn notable, incluso en la posición de la boya situada a 40km de la costa, registrando una variación máxima en la temperatura del aire de 5,29°C. Durante esta época del año la mezcla invernal ha determinado que la columna de agua sea homogénea en sus valores de temperatura y salinidad en los primeros 150 metros de las capas superficiales (ver Figura 5). Los intercambios de calor con la atmósfera se reparten en toda esa columna de agua, no teniendo un efecto tan evidente en la temperatura superficial del mar como en los casos anteriores. Aun así, el efecto Föhn es capaz de incrementar ligeramente la temperatura superficial del mar aún cuando su tendencia en esta época del año es hacia una disminución progresiva.

4. Vientos en la boya, brisas

La posición fija de la boya océano-meteorológica AGL permite comprobar la hipótesis de evolución del área cubierto por una brisa marina (virazón) genuina ([5]).

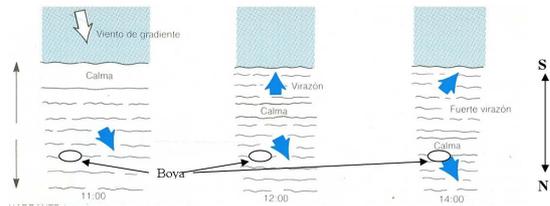


Figura 6: Esquema del comportamiento de una brisa marina [5].

La mañana comienza con un viento de madrugada que sopla hacia la mar. A medida que la tierra se caldea cesa ese viento y comienza a aparecer la virazón hacia la costa, generalmente antes de mediodía.

Arreciará normalmente y de modo constante a lo largo de las dos o tres horas siguientes y cambiará de dirección en el mismo sentido que el sol. Dentro de dicha área, la cual hemos comprobado que puede llegar hasta más de 40 km de la línea de costa, se ve inicialmente una zona de calma o vientos muy flujos a lo largo de la costa. Esta zona se irá desplazando mar adentro a medida que se desarrolla la virazón y la misma será más intensa cerca de tierra que mar adentro. Se ha comprobado en varias situaciones de brisa durante la época de verano de los años 2008 y 2009.

Se muestran gráficos con la evolución del viento en una fecha de buena brisa tanto en costa (Santander) como en la boya AGL. Se aprecia el paso de la zona de

divergencia y, consecuentemente, vientos más flojos por la boya. Este comportamiento del viento en la boya se comprueba en numerosas ocasiones.

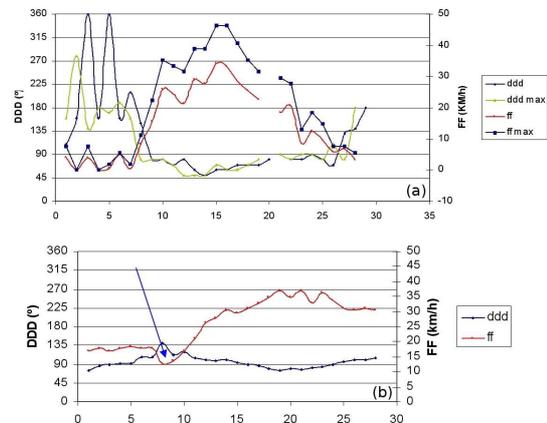


Figura 7: Brisas en Santander (AEMET) y en la boya AGL el día 22 de Julio de 2008.

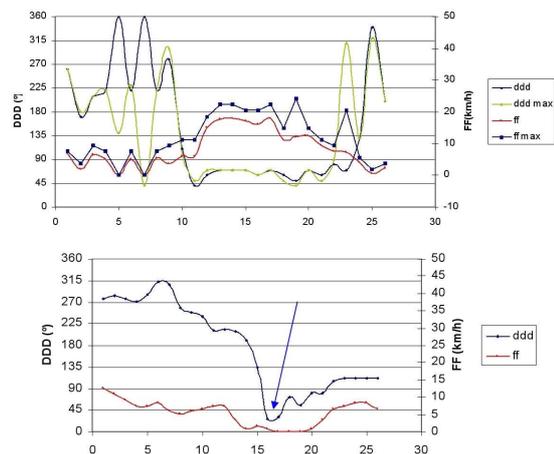


Figura 8: Brisas en Santander (AEMET) y en la boya AGL el día 19 de Junio de 2008.

El día 22 correspondió (Figura 7) a una buena brisa muy desarrollada y el día 19 de junio (Figura 8) sería una evolución similar pero con una brisa menos desarrollada.

Otro ejercicio interesante, consiste en comparar por ejemplo dos rosas de vientos. Una realizada con los datos del Observatorio de Santander de la Agencia Estatal de Meteorología (Figura 9a), y la otra con los datos de la Boya AGL (Figura 9b), ambas del año 2008.

Se aprecia claramente, que en la rosa de AEMET existe una gran cantidad de vientos de componente S a OSO, que en su mayoría son muy suaves están producidos por el gradiente de temperatura tierra-mar, mientras que en la Boya, dicha situación como cabría esperar, no es apreciable.

También se puede constatar como los episodios de viento en el mar suelen suceder con velocidades

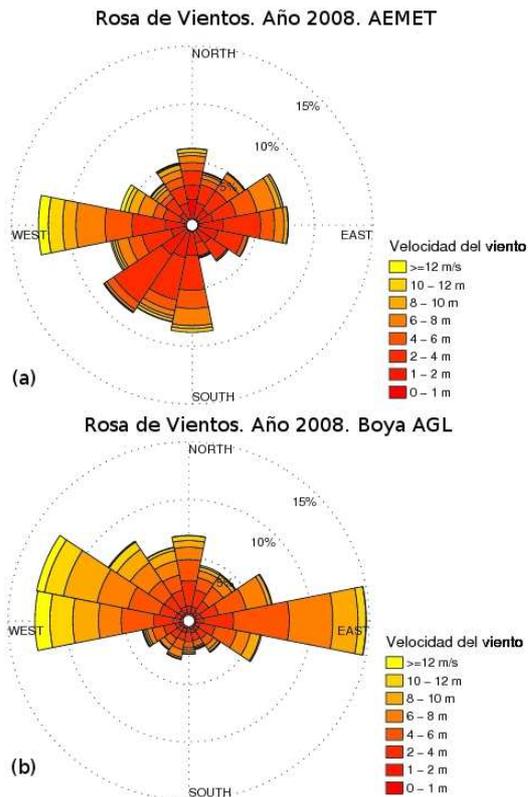


Figura 9: Rosas de vientos del año 2008. (a) AEMET-Santander, (b) Boya AGL

más altas que en tierra, dominados claramente por vientos de componente Oeste. Así mismo se observa una considerable componente E.

5. Temporales severos y oleaje extremo

Desde Junio de 2007, cuando la Boya AGL comenzó su operación, se han registrado tres grandes temporales en el Golfo de Vizcaya (Figura 10). Durante el último, el 24 de Enero de 2009, la boya registró un máximo individual en la altura de ola de 26,13m, el máximo valor registrado nunca por la red española de boyas. Dadas las severas condiciones del temporal, la boya se liberó de sus anclajes y derivó hacia el Este durante dos días, hasta que fue recobrada cerca de la frontera francesa.

La mayor parte de las olas son creadas por el viento, si bien se pueden generar otros tipos de oleaje debido a causas distintas, como pueden ser las mareas, los tsunamis, las “olas de salpicadura” o incluso generadas por humanos en por ejemplo, detonaciones en pruebas nucleares. En este caso, solamente se tendrán en cuenta las olas generadas por el viento.

El mecanismo por el cual, el viento genera oleaje, es el siguiente:

En un mar en calma, el viento produce cierta fric-

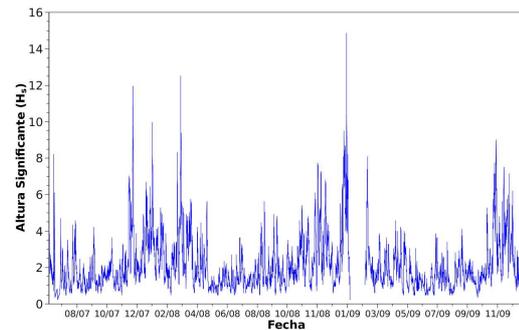


Figura 10: Altura significativa del oleaje registrado por la Boya AGL desde el 1 de Agosto de 2007 hasta Enero de 2010. Se aprecian los tres temporales como los tres picos más altos de la gráfica.

ción sobre la superficie del agua, formando rizaduras (ondas capilares) de solo unos milímetros de altura y menos de 2 centímetros de longitud de onda. La fuerza restauradora fundamental en este tipo de olas es la tensión superficial. A medida que la superficie del mar se vuelve rugosa el viento ejerce más fricción sobre ella y la interacción es más efectiva, creando las olas de gravedad. En este punto, la gravedad sustituye a la tensión superficial como principal fuerza restauradora. A medida que la ola gana energía, su altura crece más rápidamente que su longitud de onda. Las crestas pasan de ser redondeadas a puntiagudas, creando olas de forma trocoidal. El viento aumenta la energía, altura y velocidad de la ola, y cuando la velocidad del viento y la de la ola son iguales, su longitud de onda y su altura ya no pueden crecer más debido a que ya no existe intercambio neto de energía, y por lo tanto la ola ha alcanzado su máximo.

Los factores que determinan la cantidad de energía de las olas son

1. La velocidad del viento
2. El tiempo durante el cual el viento sopla en una dirección
3. El *fetch*, la distancia en la cual el viento sopla en una dirección

La Figura 11 muestra los principales parámetros de una ola definida de la forma más simple posible, que son:

- El punto más alto de la ola es la *cresta*
- El punto más bajo el *valle*
- La altura de la cresta sobre el nivel del mar sin perturbar (SWL) es la *amplitud a*
- En condiciones de pequeñas amplitudes es la mitad de la *altura de ola H*; $a = H/2$
- El intervalo de tiempo que sucede entre el paso de dos crestas o valles consecutivos es el *periodo T*

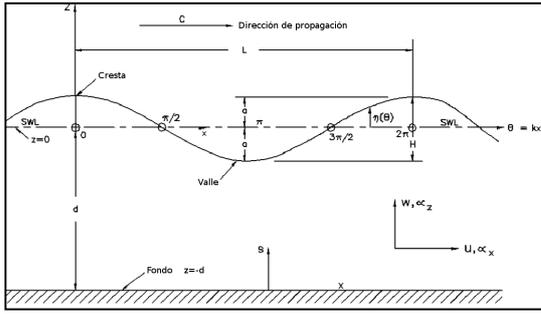


Figura 11: Parámetros de una ola bidimensional, sinusoidal, de pequeña amplitud definible a partir de su periodo y altura.

- La *longitud de onda* L , es la distancia entre dos puntos idénticos entre dos crestas o dos valles sucesivos

Otros parámetros importantes incluyen

- La *frecuencia angular* $\omega = 2\pi/T$
- El *número de onda* $k = 2\pi/L$
- La *velocidad de fase* $C = L/T = \omega/k$
- La *pendiente* $\varepsilon = H/L$
- La *profundidad relativa* d/L
- La *altura relativa* H/d

Esta formulación sencilla solo es aplicable a mares completamente desarrollados, es decir, el oleaje se encuentra fuera de la zona de vientos que lo generó (*fetch*). Las olas de los temporales que nos ocupan no cumplen esta condición, ya que se encuentran dentro del fetch, por lo que es necesaria una formulación más compleja de teorías no lineales, utilizando métodos estadísticos para describir la naturaleza tridimensional dependiente del tiempo. Este tipo de representaciones quedan fuera de los objetivos de este artículo.

La boya AGL proporciona valores de dirección, altura y periodo del oleaje, siendo necesario calcular el resto de los parámetros.

Si se pueden definir, en función de las expresiones d/L y kd , tres tipos de oleajes: de aguas profundas, de aguas de transición y de aguas someras. La Tabla 1 muestra estas relaciones.

Clasificación	d/L	$\tanh(kd)$
Aguas profundas	$1/2$ a ∞	≈ 1
Aguas de transición	$1/20$ a $1/2$	$\tanh(kd)$
Aguas someras	0 a $1/20$	$\approx kd$

Tabla 1: Clasificación de las olas en función de las relaciones entre algunos de sus parámetros básicos

A pesar de que en realidad la simplificación para aguas profundas ocurre a profundidad ∞ , para la mayoría de los casos prácticos, se aproxima a la unidad para valores de d/L mucho menores. Para una profundidad relativa (d/L) de $1/2$, $\tanh(2\pi d/L) = 0,9964$.

Cuando la profundidad relativa es mayor que $1/2$, las características de la ola son virtualmente independientes de la profundidad. Las condiciones de aguas profundas se indican con el subíndice 0, tal como L_0 o C_0 , salvo el periodo T que se mantiene constante e independiente de la profundidad.

Se presentará a continuación, información sobre los oleajes producidos durante estos temporales, así como las condiciones atmosféricas que propiciaron estos fenómenos.

Se pueden distinguir dos tipos de datos procedentes de la boya.

Por un lado los datos transmitidos a la estación de Santander. Estos datos, se reciben con frecuencia horaria y son valores promediados durante ese tiempo en el caso de sensores que registren valores con mayor frecuencia.

El otro tipo de datos son los almacenados, que para el caso concreto del sensor de oleaje (Datawell MarkII)[6] registra 2048 valores a la hora. Estos datos son más útiles a la hora de estudiar las características del oleaje, pero solamente están disponibles tras una operación de recuperación o mantenimiento.

Se han registrado durante el tiempo de fondeo de la boya AGL, tres grandes temporales en la costa cantábrica, en Diciembre de 2007, Marzo de 2008 y Enero de 2009, dando todos ellos como resultado oleaje de altura significativa $H_s > 10m$.

Como resultado de estos temporales se registraron en la Boya AGL los oleajes correspondientes a las representaciones de las Figuras 12, 13 y 14

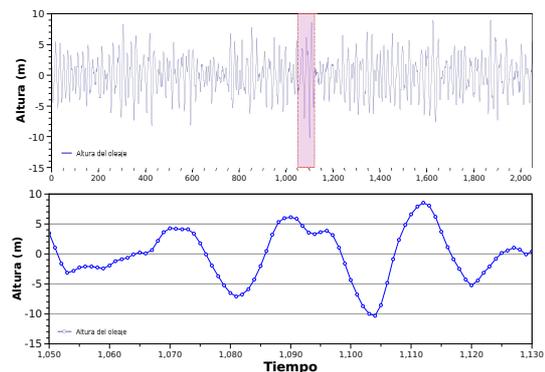


Figura 12: Alturas reales del oleaje durante la hora en la que se detectó la altura máxima, y detalle de la ola máxima. Diciembre de 2007.

Las alturas y periodo medidos para cada ola máxima en cada temporal se muestran en la Tabla 2

Los datos con los que se han representado las Figuras, así como los datos de la tabla, son datos

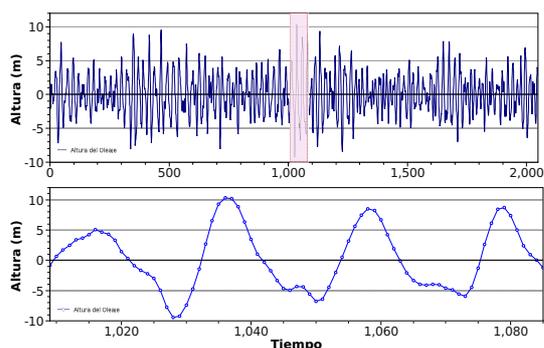


Figura 13: Alturas reales del oleaje durante la hora en la que se detectó la altura máxima, y detalle de la ola máxima. Marzo de 2008.

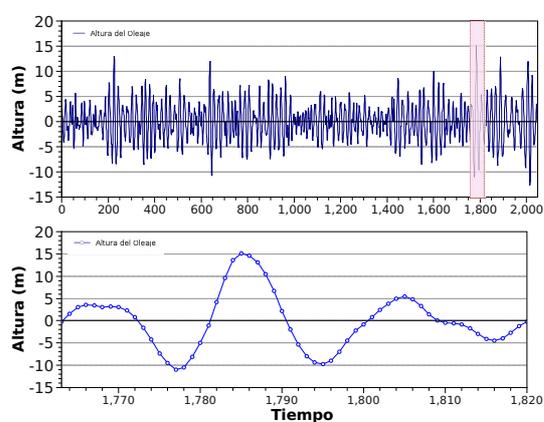


Figura 14: Alturas reales del oleaje durante la hora en la que se detectó la altura máxima, y detalle de la ola máxima

	Dic 2007	Mar 2008	Ene 2009
$H_s(m)$	11,95	12,59	14,88
$H_{down}(m)$	-6,35	-9,42	-11,01
$H_{up}(m)$	8,87	10,35	15,12
$H_{max}(m)$	15,22	19,77	26,13
$T(s)$	34,93	38,95	34,5

Tabla 2: Características de la olas máximas registrada durante los tres grandes temporales de Diciembre de 2007, Marzo de 2008 y Enero de 2009

almacenados, es decir solamente están disponibles tras una operación de mantenimiento de la boya. Estos datos una vez extraídos proporcionan información útil acerca de varios aspectos del oleaje.

Un primer análisis de estos datos conlleva la representación gráfica de las alturas del oleaje, ya que los datos transmitidos al centro solamente proporcionan la altura significativa, es necesario el uso de estos para la determinación de las alturas máximas.

Los oleaje generados por los temporales de Diciembre de 2007 y Marzo de 2008, se deben a vientos originados en bajas presiones con su centro al norte

del Mar Cantábrico. Estas bajas presiones crearon en el 2007 y 2008, alturas de ola de $H_{max} = 15,22m$ y $H_{max} = 19,77m$ respectivamente. En el caso del temporal de Marzo de 2008, su altura significativa $H_s = 12,59m$ ya supuso un récord en las medidas registradas por la red española de boyas.

El caso del temporal de Enero de 2009, es más especial, ya que en esta ocasión el temporal fue debido a una ciclogénesis explosiva que elevó las alturas significativas y máximas a cotas sin precedentes en los registros españoles. Una presión atmosférica de $980hPa$ y una velocidad del viento sostenida de $83km/h$ fueron capaces de generar unos oleajes de $H_s = 14,88m$ y $H_{max} = 26,13m$. Tal fue la fuerza de este temporal, que tras el paso de esta ola, la boya se soltó de sus anclajes y derivó hacia el Este, siendo recuperada unos días después cerca de la frontera francesa.

Referencias

- [1] Borja, A., Collins, M., *Regional Seas integrative studies, as a basis for an ecosystem-based approach to management: The case of the Bay of Biscay*, Continental Shelf Research Vol., 29 pp951–956, 2009.
- [2] Kantha, L.H. and Clayson, C.A., *Small scale processes in geophysical fluid flows*, Edited by Academic Press, in International Geophysics Series, Vol., 67, 2000.
- [3] Taylor, P. K (2001), Heat and moment fluxes at the sea surface, in *Encyclopedia of Ocean Sciences*, vol. 3, edited by J. H. Steele, S. A. Thorpe, and K. K. Turekian, pp. 1187–1194, Academic Press, doi10.1006/rwos.2001.0149.
- [4] Somavilla, R., Gonzalez-Pola, C., Rodriguez, C., and Lavin, A., *Upper ocean variability in the south-eastern corner of the Bay of Biscay. From atmospheric forcing to oceanic response.*, submitted to Journal of Marine Systems.
- [5] Houghton, D. *La estrategia del viento* Ed. Pirámide, Madrid, 1989
- [6] Datawell bv - Laboratory for Instrumentation http://download.datawell.nl/documentation/...directional_waverider_mkii_brochure.pdf