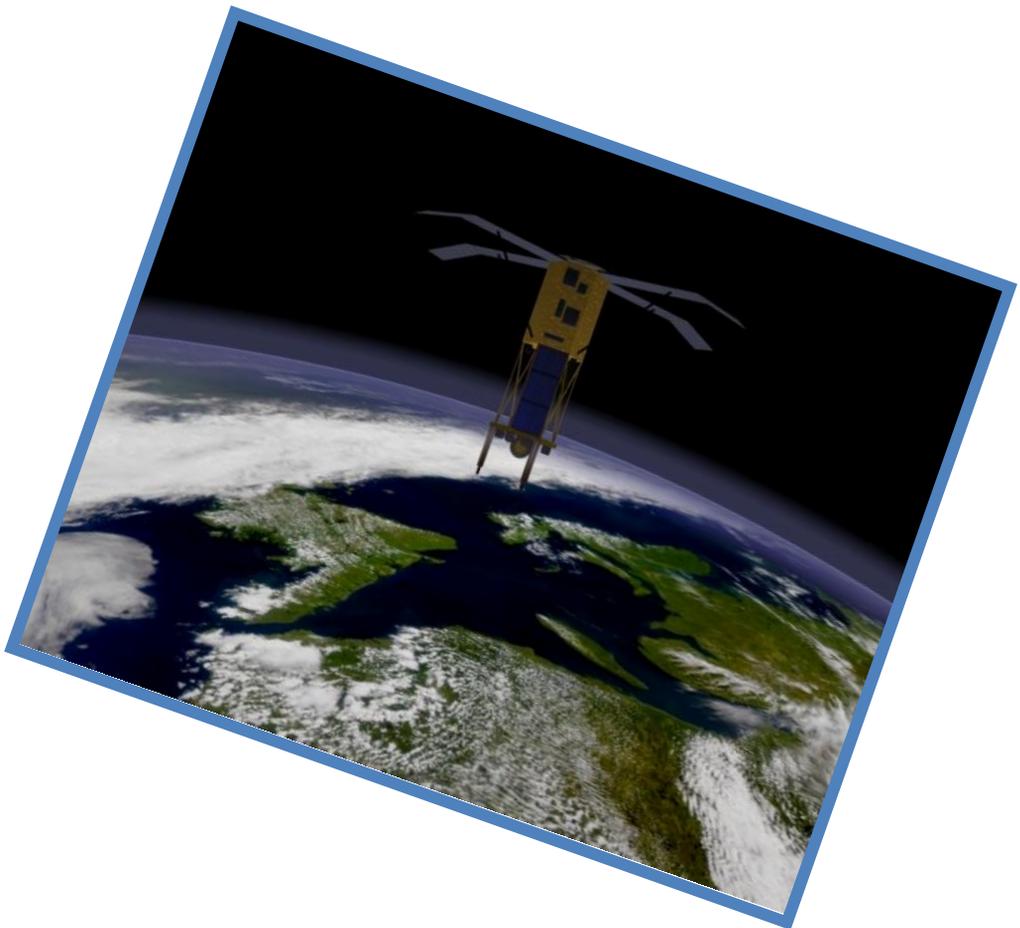


TRABAJO FIN DE GRADO

Variabilidad de la Clorofila-a en las aguas costeras de la Península Ibérica entre 1998 y 2007 usando datos de SeaWiFS



Faculta_{de}Ciencias

Lorena Salgado Costa
Grado en Ciencias Ambientales
Marzo 2014

Universida_{de}Vigo

Variabilidad de la Clorofila-a en las aguas costeras de la Península Ibérica entre 1998 y 2007 usando datos de SeaWiFS

Trabajo Fin de Grado de Ciencias Ambientales

Facultade de Ciencias de Ourense

Lorena Salgado Costa

Dra. M^a de las Nieves Lorenzo González, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo

INFORMA:

Que el trabajo titulado "**Variabilidad de la Clorofila-a en las aguas costeras de la Península Ibérica entre 1998 y 2007 usando datos de SeaWiFS**" presentado por **D^a./D. Lorena Salgado Costa**, con **D.N.I.: 44494396**, ha sido realizado bajo mi dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizo su presentación como **Trabajo Fin de Grado** del **Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense , 19 de Febrero de 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M.ª Nieves L. González', with a long horizontal flourish extending to the right.

D^a. M^a de las Nieves Lorenzo González

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. CLOROFILA-a.	7
1.2. IMPORTANCIA DE LA PESQUERÍA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA.....	11
2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA.....	13
2.1. CLIMATOLOGÍA	14
2.2. ZONAS COSTERAS	17
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	20
3.1. DATOS	20
3.2 MÉTODOS.....	23
4. RESULTADOS.....	26
5. CONCLUSIONES.....	40
Bibliografía.....	42

La figura de la portada ha sido tomada de la página de la NASA, <http://www.nasa.gov>.

1. INTRODUCCIÓN

En ecología se llama producción primaria a la producción de materia orgánica que realizan los organismos autótrofos a través de los procesos de fotosíntesis o quimiosíntesis. La producción primaria es el punto de partida de la circulación de energía y nutrientes a través de las cadenas tróficas. En los océanos los productores primarios son sobre todo algas unicelulares que forman el fitoplancton. El fitoplancton presenta una gran biodiversidad, encontrándose diversas especies en función de las condiciones naturales del lugar y de la presencia o ausencia de nutrientes, episodios de eutrofización, etc. Las diferentes especies que se pueden encontrar pertenecen a uno de estos grupos:

- Diatomeas
- Dinoflagelados
- Cianófitos o algas verdeazuladas
- Algas pardas
- Cocolitofóridos

Dentro de este grupo las más abundantes son las diatomeas (que poseen un esqueleto silíceo) y los dinoflagelados.



Figura 1.1 Imágenes de fitoplancton marino. (Imágenes tomadas de <http://ecoacuaticogme.blogspot.com.es> y <http://bibliotecaduocvalparaiso.blogspot.com.es>).

Aunque las algas planctónicas tienen una sola célula que mide décimas de milímetro, la masa orgánica total que representan en el mar es más grande que la de las plantas de mayor porte que habitan en el mismo estrato marino. Su número alcanza cifras astronómicas y comprende tal cantidad de organismos que se puede comparar con los existentes en el medio terrestre. Los vegetales sólo pueden existir en las capas más superficiales del océano, hasta una profundidad no superior a los 200 metros, debido a que necesitan la luz solar para llevar a cabo, con ayuda de su pigmento verde llamado clorofila, la fotosíntesis. Ésta consiste en la síntesis de la materia nutritiva, representada por los azúcares, grasas y proteínas, a partir del agua, el CO₂ y los

nutrientes que fijan a partir del agua del mar, como nitrógeno, potasio, calcio, sílice, hierro y otros elementos. Durante este proceso de síntesis los vegetales expulsan oxígeno que se disuelve en el agua o pasa a la atmósfera. Se puede considerar que las aguas que cubren la plataforma continental representan la zona más propicia para el desarrollo del fitoplancton, porque en ella se encuentran los elementos básicos, nutrientes y luz solar, que éste necesita para su vida. La superficie en el mar abierto recibe gran cantidad de luz solar, pero es pobre en nutrientes, y aunque éstos abunden en las aguas profundas, al faltar la luz, la existencia del fitoplancton es muy escasa.

La actividad fotosintética que realizan los organismos del fitoplancton cambia de acuerdo con la cantidad y tipo de luz que reciben. De acuerdo con la intensidad luminosa se presentan variaciones del fitoplancton en los distintos mares. Por ejemplo, en los tropicales se localiza gran cantidad de él durante todo el año, mientras que en los mares templados se presenta el máximo en verano. En los mares de latitudes elevadas, cuando se inicia la noche polar, la iluminación es mínima, por lo que la cantidad de vegetales planctónicos es casi nula y sólo subsisten algunas diatomeas que requieren pequeñas cantidades de luz y que incluso son capaces de multiplicarse bajo una capa de hielo muy gruesa.

La penetración de las radiaciones luminosas también está relacionada con la transparencia del agua: cuando ésta disminuye debido a la presencia de materia en suspensión, como la que acarrearán los ríos en los estuarios, también lo hace el fitoplancton. La transparencia también puede disminuir cuando aumenta el propio plancton. El plancton vegetal es más abundante donde emergen a la superficie las aguas profundas, muy ricas en sustancias minerales, y que representan la materia prima para los vegetales verdes. Gracias al fitoplancton se desarrollan incontables microorganismos que forman el zooplancton, del que a su vez dependen grandes concentraciones de peces y otros animales marinos.

La cantidad de fitoplancton que contiene el mar varía a lo largo del año. Durante el invierno y el inicio de la primavera, las capas superficiales del mar se enriquecen con nutrientes debido a la presencia de temporales en el mar que hacen que las aguas se revuelvan, y que gran cantidad de sustancias minerales y nutrientes depositados en el fondo asciendan de manera que al inicio de la primavera la concentración de materia inorgánica en la superficie es mayor que en cualquier otra época del año. Estas sustancias minerales representan un fertilizante ideal para el fitoplancton que conjuntamente con el incremento de luz solar que recibe durante esta época del año estimula su reproducción, que aumenta en proporciones astronómicas, (más de 200 mil individuos por litro de agua). La primavera del mar pertenece al fitoplancton, pero principalmente a las diatomeas, que cubren amplios tramos del océano, dándole una coloración pardo-verdosa (ver figura 1.3) que es característica del pigmento que se encuentra en el cuerpo de estas pequeñas plantas. Esta proliferación de plancton no

dura mucho tiempo, ya que de manera paralela aumenta el número de animales, convirtiéndose la superficie del agua en un vivero gigantesco.



Figura 1.2 Cadena trófica marina. (Imagen tomada de http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/biologia/modulos/Curso/uni_05).

No obstante, ocasionalmente se presentan periodos esporádicos de fertilidad en el océano; esto sucede cuando, debido a las corrientes y a los vientos, las aguas profundas del mar salen a la superficie llevando consigo gran cantidad de nutrientes, provocando que la producción primaria se encuentre sujeta a una alta variabilidad espacio-temporal sobre todo en los mares de climas templados (Cebrián y Valiela 1999; Bode et al., 2005; Muyllaert et al., 2006; Gameiro et al., 2010). Los afloramientos de fitoplancton por lo general son debidos a cambios físicos que tienen lugar en el océano (por ejemplo, surgencias), en la atmósfera (vientos), o en la tierra (precipitación y escorrentía de los ríos). Estos eventos tienen diferentes escalas de variabilidad, lo que da lugar a que los afloramientos de fitoplancton pueden ser ocasionales y a corto plazo, estacionales, o esporádicos asociados con condiciones climáticas o hidrológicas extraordinarias (Cloern, 1996; Cloern, 2001).

Todo este fitoplancton es el producto primario de la materia orgánica que permite el establecimiento de las cadenas tróficas oceánicas. Se puede decir que de él depende la riqueza marina en las diferentes regiones oceánicas. El fitoplancton se tiene que comparar con los pastizales en los continentes y dependen de él todos los organismos animales que habitan en el océano. Por todo ello, resulta esencial conocer la variabilidad espacial y temporal de la biomasa y producción del fitoplancton para entender los ciclos del carbono oceánico, los cambios en las poblaciones de recursos pesqueros, y el acoplamiento del forzamiento físico-biogeoquímico de los ecosistemas pelágicos con una base regional.

Aunque la gran mayoría de los estudios biológicos se llevan a cabo con medidas in situ, a partir del uso de sensores satelitales que captan el color del océano ha sido posible estimar la biomasa del fitoplancton (clorofila-a) a grandes escalas espaciales. Los resultados derivados de esta información han revolucionado el campo de la oceanografía biológica, con importantes contribuciones a la biogeoquímica, oceanografía física, modelos del sistema oceánico, pesquerías y al manejo costero. Actualmente, la clorofila-a del fitoplancton marino es uno de los pocos, por no decir único componente biológico del ecosistema marino que puede ser monitorizado por medio de la percepción remota del océano (Platt et al., 2008).

1.1. CLOROFILA-a.

La clorofila-a es el pigmento fotosintético presente en el fitoplancton, y el que le da un color verdoso a éste. La concentración de clorofila-a oceánica permite una estimación de la concentración de fitoplancton y por lo tanto, de la actividad biológica. Es un indicador básico de producción primaria.

Todos los procesos biológicos están ligados a la producción primaria, por lo tanto es importante su estudio para conocer cualquier aspecto de los ecosistemas marinos (Rojas-Acuña et al., 2011). Comprender la dinámica de la clorofila-a en relación con las presiones antropogénicas (por ejemplo, los residuos urbanos entradas de agua) y los aportes de nutrientes naturales es importante para evaluar la calidad del agua y su influencia en actividades como la pesca.

Como se mencionó en la sección anterior, en ambientes marinos, la producción primaria es el resultado del movimiento de las masas de agua y de las condiciones de luz y nutrientes (Picado et al., 2013). De estas condiciones dependerá la concentración de clorofila. Los pigmentos de ésta tienen una firma espectral específica y distintiva, ya que absorben en las longitudes de onda correspondientes a los colores azul (455-492nm) y rojo (622-700nm) del espectro, así como una reflectancia fuerte en el verde (492-577nm), afectando por lo tanto al color del océano. Las observaciones multiespectrales del océano con sensores espaciales, permiten la observación de estos cambios de color en el océano localizando las áreas de concentración de fitoplancton (Somoza et al., 2007).

Observando los datos satelitales y conociendo las áreas con mayor concentración de fitoplancton, se pueden localizar las mejores zonas pesqueras, puesto que las áreas ricas en fitoplancton son las más activas biológicamente y las más favorables para la pesca.

El fitoplancton está siempre presente en el agua, pero la luz del sol más fuerte en primavera, así como los aportes de sedimentos ricos en nutrientes del agua dulce que descargan los ríos, hacen que tengan lugar concentraciones de fitoplancton de gran intensidad durante esta época del año. Los eventos de fitoplancton pueden durar semanas o meses. Como ya se ha dicho previamente, los afloramientos son muy beneficiosos para las especies marinas, ya que estas pequeñas plantas flotantes son la base de la cadena trófica oceánica, desde el zooplancton, hasta pequeños peces y ballenas. Sin embargo, algunas algas y plancton se pueden convertir en peligrosas, ya sea a través de la producción de toxinas químicas o al agotar gravemente el suministro de oxígeno en el océano creando "zonas muertas " que asfixian a las criaturas marinas, como es el caso de las mareas rojas.

La figura 1.3, sacada por los satélites de la NASA en el Golfo de Vizcaya, muestra uno de estos afloramientos o *blooms* de fitoplancton típico de primavera. Los remolinos de colores en la superficie del agua muestran la ubicación de estos organismos microscópicos, similares a las plantas, que se mueven con las corrientes marinas.

Además de los espectaculares *blooms* primaverales también ocurren eventos similares durante el verano cuando debido a las condiciones atmosféricas tiene lugar el fenómeno de afloramiento o upwelling producido por el viento. Durante el otoño y el invierno, las variaciones de Chl-a dependen de factores como el aporte de nutrientes transportados por los ríos o la ocurrencias de temporales en el océano que mezclen las aguas superficiales con las aguas profundas. (Álvarez et al., 2012).

Alrededor del 90% de las zonas pesqueras del mundo se sitúan en áreas en las que es frecuente que se produzcan fenómenos de afloramiento. Como se ha explicado, el afloramiento hace emerger a la superficie aguas ricas en nutrientes procedente de las zonas más profundas, esto da lugar a una rica proliferación biológica y a una mayor concentración de clorofila-a que es captada por los sensores satelitales.



Figura 1.3 Bloom de fitoplancton captado por los satélites de la Nasa en el Golfo de Vizcaya durante la primavera de 2013. (Imagen tomada de <http://earthobservatory.nasa.gov>).

En la Península Ibérica, el fenómeno de afloramiento debido a las condiciones atmosféricas se da sobre todo en la costa Oeste, que es el límite superior del sistema de afloramiento del este del Atlántico Norte (*Eastern North Atlantic Upwelling System*).

Cuando hablamos de afloramiento, hablamos fundamentalmente de movimientos verticales de las aguas debidos a la acción del viento. Cuando el viento sopla sobre el agua, la fricción entre el viento y el agua transfiere una pequeña cantidad de la energía del viento al agua, iniciando su movimiento. Con el tiempo y vientos dominantes, se forma una corriente superficial. En la dirección de esta corriente también influye la rotación terrestre, que ocasiona el conocido efecto Coriolis, el cual desvía la dirección de un objeto en movimiento, en este caso la masa de agua hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur. Este desplazamiento depende de la velocidad de la partícula en movimiento y de la altitud, ya que tiene su máximo valor en los polos y su mínimo en el ecuador.

La energía del viento es transmitida en dirección descendente por la columna de agua de manera que pone en movimiento las capas inferiores de forma sucesiva, pero cada capa recibe una cantidad de energía inferior a la anterior, de modo que su velocidad también será inferior. Y cada capa será desviada con respecto a la superior debido a la fuerza de Coriolis, la cual se incrementa al disminuir la velocidad. Todo esto da lugar a lo que conocemos como espiral de Ekman. Es un modelo teórico que explica el efecto del viento sobre las aguas oceánicas. En la figura 1.4 se muestran las fuerzas que

ocasionan la mencionada espiral y en la figura 1.5 se muestra un esquema del afloramiento costero en el Hemisferio Norte.

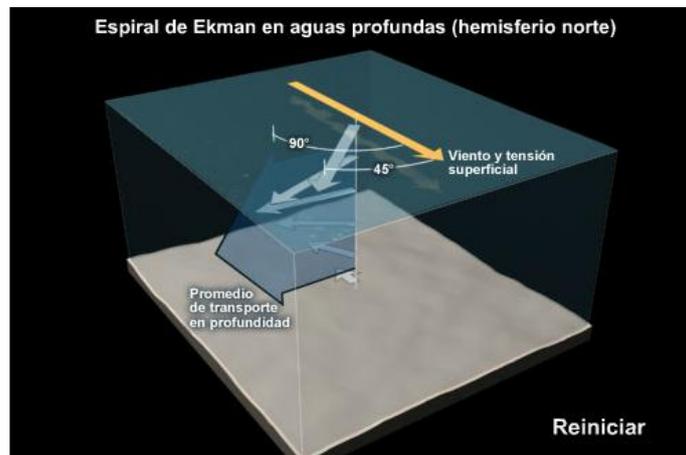


Figura 1.4 Espiral de Ekman en aguas profundas (Hemisferio Norte). (Imagen tomada de <http://www.meted.ucar.edu>).

Muchos factores contribuyen a la intensidad y frecuencia del afloramiento, siendo los más importantes una plataforma continental estrecha y vientos favorables. El afloramiento costero es más común a lo largo de las costas occidentales de los continentes, especialmente Norteamérica, Sudamérica y el suroeste de África. Los litorales montañosos y la corrientes frías orientales (ver figura 1.6) provocan condiciones favorables al afloramiento.



Figura 1.5 Afloramiento costero en el Hemisferio Norte. (Imagen tomada de <http://www.meted.ucar.edu>).

Las condiciones favorables de afloramiento producido por los vientos en el Hemisferio Norte se dan al final de la primavera y durante el verano, siendo poco probable que

ocurra este fenómeno en invierno debido a la gran variabilidad de esta estación. (Taboada, 2007). El mecanismo que genera el afloramiento en verano y en invierno es muy similar, pero las propiedades del agua aflorada son diferentes. Esto es debido a que existe un ciclo anual con diferentes masas de agua en la plataforma dependiendo de la época estacional (Álvarez, 2005).

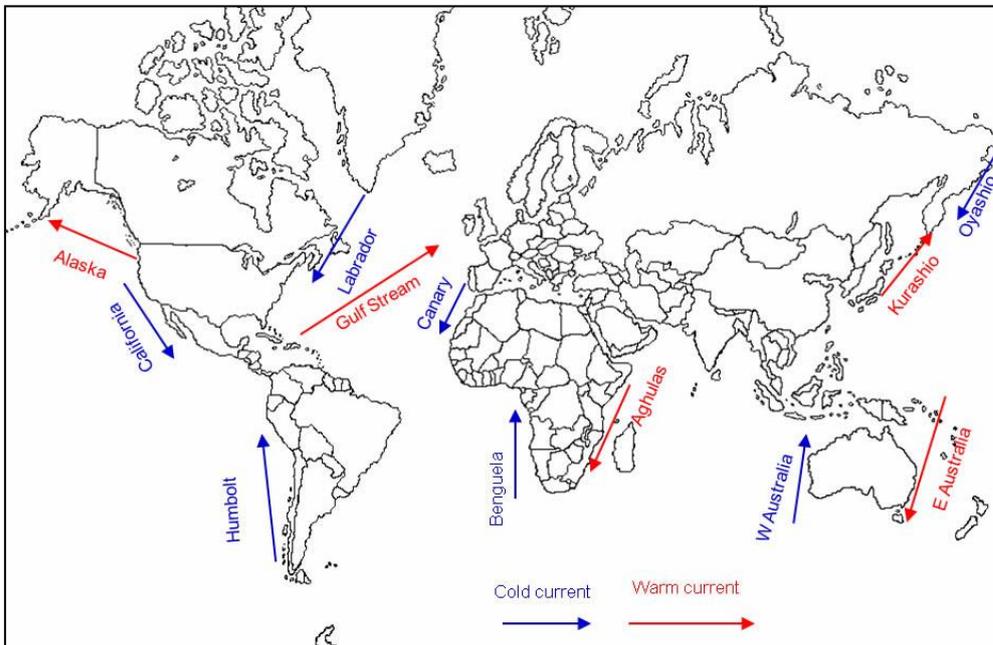


Figura 1.6 Principales Corrientes oceánicas. En azul se señalan las corrientes de aguas frías y en rojo las de aguas cálidas. (Imagen tomada de <http://www.claseshistoria.com/>).

Además del fenómeno del afloramiento, otro importante aporte de nutrientes es el debido a la descarga de los ríos. Esta escorrentía muestra una gran variabilidad estacional, con el máximo valor de descarga en invierno y el mínimo en verano, siguiendo el patrón de lluvias. La alta concentración de nutrientes que tiene el agua proveniente de los ríos fertiliza el agua costera, provocando el desarrollo de un *bloom* de fitoplancton.

1.2. IMPORTANCIA DE LA PESQUERÍA EN LA PENÍNSULA IBÉRICA

España es un país marítimo, que cuenta con una estrecha y prolongada plataforma continental muy rica en recursos pesqueros. Las aguas jurisdiccionales españolas, definidas como las que discurren desde la línea de base recta hasta la línea exterior de 200 millas náuticas, que delimita la Zona Económica Exclusiva (ZEE), constituyen el Caladero Nacional. En él faena la mayor parte de la flota pesquera española en cuatro

zonas pesqueras diferenciadas: Cantábrico-Noroeste, Golfo de Cádiz, Canarias y Mediterráneo.

Según un informe de la FAO, España es el segundo país europeo con mayor índice anual de consumo de productos pesqueros (40,5 kilos por habitante y año, por detrás de Portugal), y se sitúa en el tercer puesto del ranking mundial de importaciones, por detrás de Japón y EE.UU, y en el décimo de exportaciones. (Magrama, 2009).

La participación del sector pesquero en la actividad económica de España se sitúa en torno al 1% del IB. Su importancia es mayor en regiones del norte y noroeste del país. En el caso de Portugal se puede afirmar que la contribución de la pesca al PIB es inferior al 1,5%. No obstante, en el ámbito de la alimentación, por ejemplo, un consumo anual de 60 kg de pescado por habitante, constituye un valor elevado, convirtiéndolo en el primer país europeo en consumo de productos pesqueros.

Cabe señalar que según datos de la FAO, la cantidad de pescado destinada a consumo humano se incrementó a lo largo de la década de los 90, con lo que existe una demanda a la que hay que dar respuesta.

Alrededor del sector primario extractivo existen numerosas actividades complementarias relacionadas, que configuran un conjunto económico y social inseparable. Por lo tanto, hay que considerar que la pesca y los cultivos marinos son de gran importancia para muchas zonas costeras, dado que el empleo está asociado con la captura y transformación de este recurso (Anadón et al., 2005). Esto ratifica la importancia de conocer los procesos de producción primaria en las zonas costeras.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA

La zona de estudio donde se desarrolla nuestro análisis abarca toda la costa de la Península Ibérica, de unos 3.167 Km, por lo que tenemos en cuenta el área comprendida entre las coordenadas 35°N y 45°N, y entre 11°W y 5°E.

Para un mejor análisis de la costa, se ha dividido el territorio en 4 zonas bien diferenciadas: la zona correspondiente al Mar Cantábrico, la zona del Océano Atlántico, la del Estrecho de Gibraltar y por último la zona correspondiente al Mar Mediterráneo, ya que estas zonas tienen características muy distintas.

Además, para considerar el efecto que la descarga fluvial tiene sobre las zonas costeras se han considerado 5 de los principales ríos de la Península Ibérica. Para ello se ha calculado el caudal mensual de los mismos a partir de diferentes bases de datos y se ha medido la concentración de clorofila-a en la desembocadura de cada uno de ellos. Los ríos analizados son: Miño, Duero, Mondego, Tajo y Ebro y los puntos tomados en la costa para medir la concentración de clorofila en sus desembocaduras son:

Tabla 2.1 Localización de los puntos tomados en la desembocadura de los ríos para medir la concentración de clorofila.

Ríos	Miño	Duero	Mondego	Tajo	Ebro
Latitud	41.91°N	41.15°N	40.13°N	38.61°N	40.67°N
Longitud	351.08°E	351.29°E	351.01°E	350.78°E	0.80°E

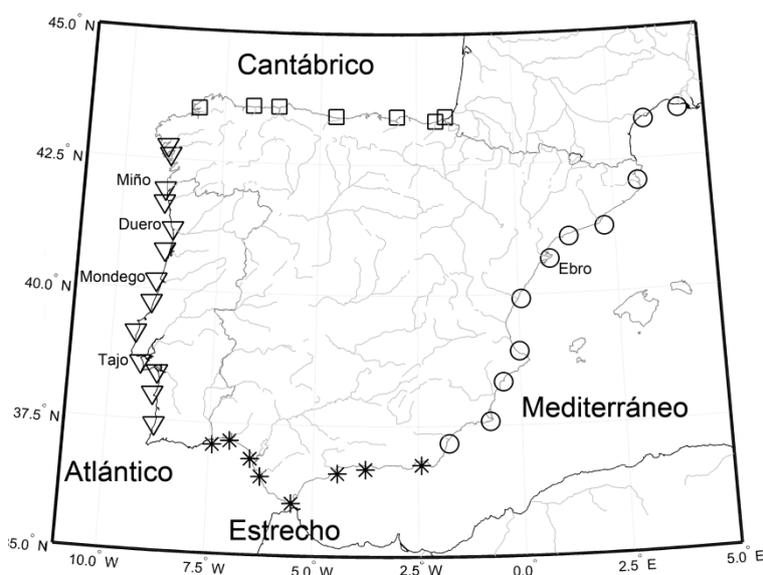


Figura 2.1 Mapa del área de Estudio. En el que se muestran las cuatro zonas costeras consideradas: Cantábrico, Atlántico, Estrecho de Gibraltar y Mediterráneo. Los puntos en los que se mide la concentración de clorofila para el posterior análisis de tendencias y las desembocaduras de los ríos analizados: Miño, Duero, Mondego, Tajo y Ebro.

En la figura 2.1 observamos las cuatro áreas en las que se ha dividido la zona costera de la Península Ibérica y los puntos tomados en cada una de ellas para analizar la concentración de clorofila. También se marca la desembocadura de cada uno de los ríos considerados en el estudio.

2.1. CLIMATOLOGÍA

Antes de comenzar el estudio propiamente dicho vamos a proceder a describir brevemente la climatología de la Península Ibérica.

La Península Ibérica se sitúa en latitudes medias (en torno a los 40° N), lo que hace que disfrutemos de un clima templado. Esta localización provoca la existencia de dos estaciones muy marcadas (invierno y verano), separadas por dos de transición (primavera y otoño), debido a la diferencia en la inclinación de los rayos solares a lo largo del año. Por otra parte, la Península Ibérica se sitúa en una zona muy activa en relación con la circulación general atmosférica: se localiza entre el cinturón de altas presiones subtropicales y el de bajas presiones de las zonas polares, en el área de la circulación en superficie de los vientos del oeste.

En la zona templada en la que se sitúa España, la circulación atmosférica en altura está dirigida por la corriente en chorro (Jet Stream). La corriente en chorro es una fuerte corriente de vientos del oeste que sopla en altura (entre 9.000 y 11.000 metros de altitud) y separa las altas presiones tropicales que quedan a su derecha y las bajas presiones subpolares que quedan a la izquierda. Cuando disminuye su velocidad crea ondulaciones profundas (dorsales y vaguadas) que introducen aire tropical hacia el norte o aire frío hacia el sur. Esta corriente que asciende de latitud en verano y desciende en invierno es la responsable del tiempo en superficie. La circulación atmosférica en superficie está dirigida por las masas de aire, los frentes y los centros de acción. La dinámica atmosférica en superficie provoca el desplazamiento de grandes masas de aire, que producen diversos tipos de tiempo. Estos centros de acción atmosférica y masas de aire se van desplazando a lo largo del año, dando lugar a variadas situaciones atmosféricas sobre la península a lo largo del año. De esta forma en invierno predominan las situaciones anticiclónicas, dando lugar a tiempo frío, seco y con cielo despejado. Cuando esta situación anticiclónica se debilita favorece la entrada de las depresiones o borrascas atlánticas por el oeste, dando lugar a un tiempo lluvioso. Por el contrario, cuando el anticiclón de las Azores se sitúa más al norte de lo normal se produce un invierno suave y seco. En primavera y otoño el predominio del tiempo inestable se debe al paso por la Península de las borrascas atlánticas del Frente Polar impulsadas por los vientos del oeste, húmedos y de gran penetración. A veces podemos encontrarnos con un otoño o primavera secos porque el anticiclón de las

Azores o el anticiclón frío siguen afectando a la Península. Finalmente, en verano, la influencia del anticiclón de las Azores hace que predomine un tiempo seco y cálido con vientos de norte que favorecen las situaciones de afloramiento en la costa oeste de la Península (Romacho et al., 2001).

Todo ello hace que los valores medios anuales de la temperatura media del aire en la Península varíen entre valores inferiores a 2.5°C, en las áreas de mayor altitud (Pirineos) y valores superiores a 17°C que se producen esencialmente en las provincias españolas de Huelva, Sevilla, Cádiz y parte de la franja costera entre Málaga y Alicante (figura 2.2).

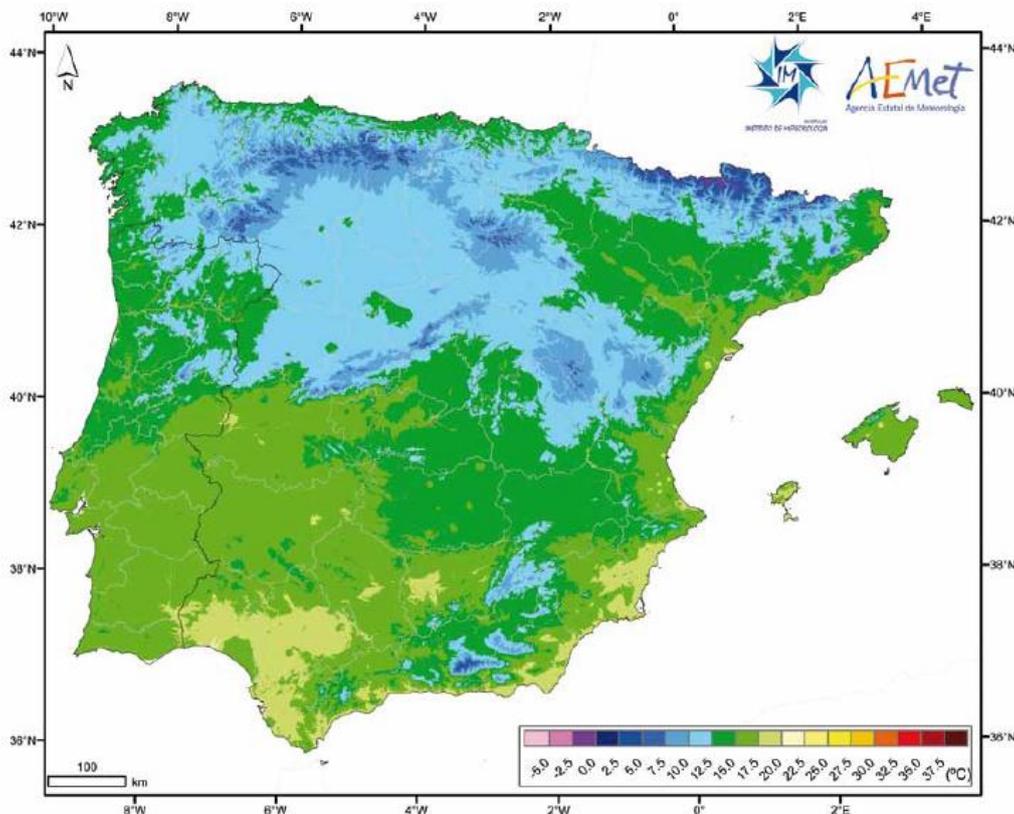


Figura 2.2 Temperaturas medias anuales. (Imagen tomada del ATLAS CLIMÁTICO IBÉRICO, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).

Los valores de la temperatura media mensual varían regularmente durante el año, alcanzando los valores máximos en verano y los valores mínimos en invierno.

En cuanto a la precipitación, íntimamente relacionada con la descarga de los ríos, cabe decir que tiene una distribución geográfica muy variada.

Los valores más elevados se registran en áreas montañosas del noroeste de Portugal, sudoeste de Galicia y noroeste de Navarra (valores por encima de los 2200 mm). Los valores más bajos se registran en el sureste de España, en las provincias de Almería y Murcia, en el sur de Alicante, (con precipitación media anual inferior a 300 mm).

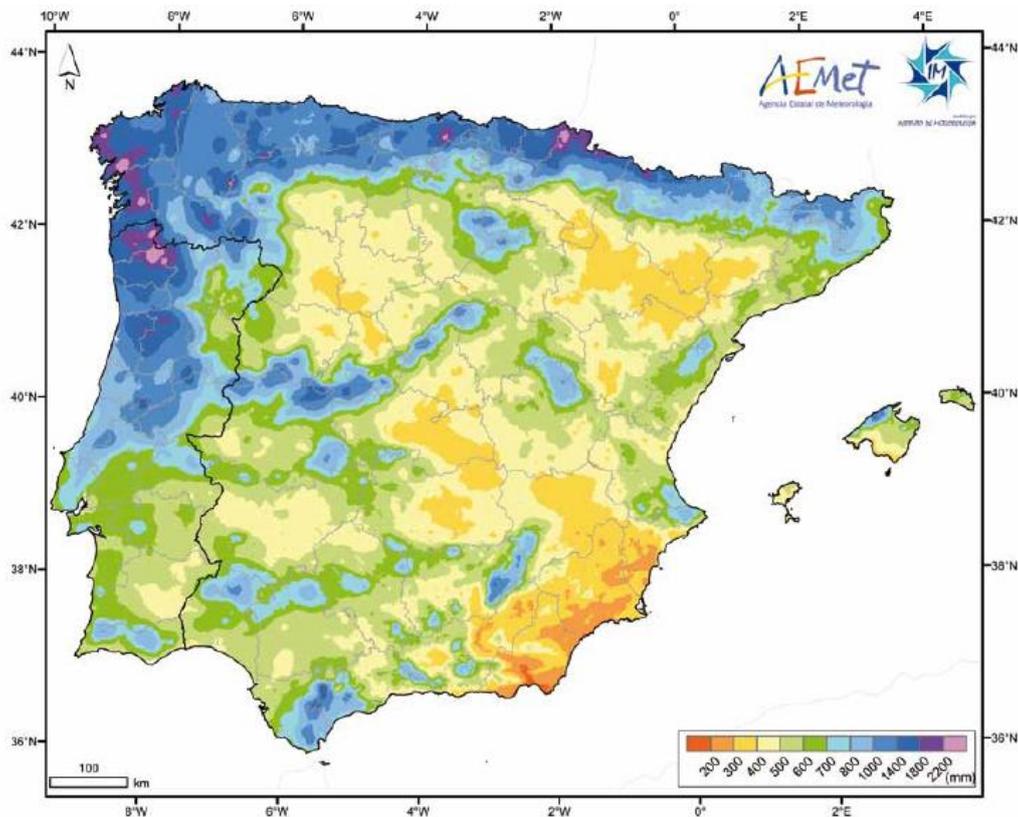


Figura 2.3 Precipitación media anual. (Imagen tomada del ATLAS CLIMÁTICO IBÉRICO, Agencia Estatal de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino).

La precipitación media mensual posee una notable estacionalidad que es más fuerte en la mitad sur peninsular y menor en el noreste, con una clara disminución de la precipitación en verano. El mes más lluvioso es diciembre y los valores más altos se producen en el noroeste de Portugal y en España en el sudoeste de Galicia. El mes más seco es julio, donde los valores más elevados de precipitación media se registran en las áreas de mayor altitud del norte de Cataluña y norte de Navarra y en algunas áreas del País Vasco, mientras que los más bajos, se registran en el sur de Portugal y en el sur de España.

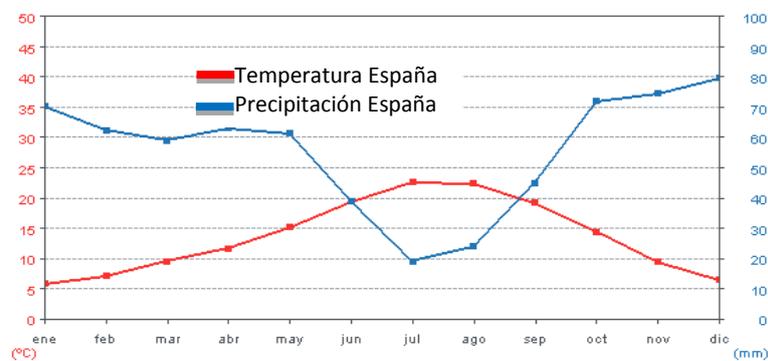


Figura 2.4 Diagrama ombrotérmico (desde el año 1940 al año 2010). (Imagen tomada de <http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/lda/recursos>).

En la figura 2.4 podemos ver un diagrama ombrotérmico teniendo en cuenta los valores medios mensuales de temperatura y precipitación de España desde el año 1940 al año 2010. Comprobamos que los meses más secos y calurosos son de junio a septiembre, destacando julio. El mes más lluvioso es diciembre, que también destaca por sus bajas temperaturas junto con enero.

2.2. ZONAS COSTERAS

En particular, en este trabajo centraremos nuestro estudio en las zonas costeras de la Península Ibérica. Estas representan una franja de enorme valor y relevancia estratégica para el futuro económico y social de la región.

En lo que a la configuración de los sistemas naturales se refiere, los ambientes litorales constituyen áreas de transición entre los sistemas terrestres y los marinos. Son fronteras ecológicas (ecotonos) que se caracterizan por intensos procesos de intercambio de materia y energía. Se pueden diferenciar dos tipos de costa por su configuración: de erosión (acantilados) y de sedimentación (playas, arenales y humedales costeros). La variedad y singularidad de los ecosistemas que confluyen en este ámbito abarcan valores paisajísticos, socioeconómicos y educativos muy importantes. Concretamente en el territorio de la Península Ibérica, el relieve accidentado y su disposición periférica, así como la elevada altitud media, se manifiestan en una costa muy acantilada en ciertas regiones costeras, aunque cabe destacar la existencia de más de 2500 km de playa. El resto del litoral presenta características de costa baja o ha sido transformado por obras de origen antropogénico.

De los ecosistemas litorales cabe destacar como más significativos: los fondos marinos, que pueden ser rocosos o arenosos; los acantilados; las playas, arenales y sistemas dunares, y los humedales costeros, en los que se incluyen las rías, estuarios, deltas, marismas y albuferas, marjales, lagunas costeras y salinas. Esta heterogeneidad de ecosistemas, se ve además acentuada por la existencia de diferencias notables entre las costa cantábrica, atlántica y mediterránea.

La zona del Cantábrico está condicionada por la presencia de cadenas montañosas que llegan hasta la costa, sin apenas llanuras. El litoral cantábrico presenta un carácter rectilíneo y en sus costas predominan los acantilados con pocas playas y numerosas rías pequeñas. El clima es templado, con borrascas que actúan a lo largo del año dando lugar a una humedad relativa alta y a unas temperaturas suaves. Los ríos son de longitud corta, pendientes fuertes y cuencas reducidas. Los depósitos son generalmente de piedra y cascajos, y los sedimentos se depositan dentro de las rías, en

la desembocadura de los ríos o en las ensenadas. El oleaje del sector noroeste determina el sentido neto del transporte litoral en dirección este. Es la segunda zona más importante por el volumen de pesca capturada y la tercera en valor económico.

La costa atlántica se caracteriza por presentar un sistema de acantilados muy desarrollado. La morfología que presenta este litoral es abrupta. Esto es debido al fuerte oleaje oceánico que presenta esta zona y a que está formado por roca antigua que pertenecía al macizo Hespérico. En esta costa la dinámica marina es mayor, pues los rangos de marea son más amplios, la intensidad del oleaje es más acusada (la carrera de marea es, por ejemplo, entre 10 y 50 veces mayor en las costas de influencia atlántica respecto la mediterránea). Esta energía provoca que los sedimentos que transportan los cursos fluviales estén situados lejos de la costa.

En todo el mundo destacan cinco corrientes marinas asociadas a zonas de afloramiento de nutrientes: la corriente fría de Canarias (afloramiento del noroeste de África), la corriente de Benguela (afloramiento sudafricano), la corriente de California (afloramiento de California y Oregón), la corriente de Humboldt (afloramiento de Perú y Chile) y la corriente somalí (afloramiento del oeste de la India). Éstas son fundamentales para el mantenimiento de los ecosistemas marinos, así como por el interés económico de las pesquerías situadas en esas zonas. El afloramiento que tiene lugar en la costa atlántica de la Península Ibérica forma parte del sistema general que se extiende a lo largo de la costa este del Atlántico norte desde aproximadamente 7.5°N hasta 44°N. (Wooster et al., 1976). Debido a la orientación de esta costa, el afloramiento sucede bajo condiciones de viento norte. Estos vientos se dan principalmente en primavera y verano, por lo que en esta zona los eventos de afloramiento ocurren desde abril hasta septiembre. Además también se ha encontrado este fenómeno en invierno, bajo condiciones meteorológicas similares a las del verano, aunque con una frecuencia de ocurrencia menor. (Álvarez, 2005).

Este fenómeno tan importante en la costa oeste de la Península adquiere una importancia mucho menor para el resto de las costas de la zona de estudio, que poseen una orientación distinta.

La costa sur está condicionada por la presencia del estrecho de Gibraltar. En esta área tenemos una mayor sedimentación que ha dado lugar a grandes playas y deltas en la desembocadura de los ríos. En la parte sur del Mediterráneo, los deltas de los ríos son de pequeño tamaño puesto que los ríos de esta zona son de escasa importancia. Sin embargo hay extensas playas originadas por depósitos marinos. Es un lugar en el que las condiciones meteorológicas son particulares. El relieve canaliza el viento que puede adoptar dos direcciones distintas: oeste y este; es decir, viento de poniente o de levante. Éste llega a alcanzar hasta 40 y 50 nudos cerca del peñón de Gibraltar. Sin embargo, 20 millas antes o 20 millas después, puede ser flojo o nulo. A través del estrecho de Gibraltar tiene lugar el intercambio de agua entre el océano Atlántico y el

mar Mediterráneo: en promedio, aguas superficiales, relativamente cálidas y poco salinas, provenientes del Atlántico entran al Mediterráneo, por encima de aguas profundas, relativamente frías y salinas, que salen del Mediterráneo. Las corrientes de marea son fuertes y varían a lo largo del día. Además, su forma de embudo y los macizos costeros a los dos lados del estrecho crean a menudo unos vientos muy fuertes. Por otra parte, el estrecho de Gibraltar es un punto de paso de atunes y otras especies marinas migratorias entre el Atlántico y el Mediterráneo. En cuanto a la zona sur atlántica, la franja litoral tiene principalmente tramos de costa baja y arenosa que se corresponden con las llanuras de las desembocaduras de los ríos Guadiana y Guadalquivir, en cuya desembocadura se encuentra el Parque Nacional de Doñana. El clima es templado-cálido mediterráneo oceánico, que se caracteriza con una acusada sequedad estival, temperaturas suaves en invierno, elevado número de horas del sol al año y periodos de sequía. Destacan la presencia de frecuentes vientos y la acción de las corrientes marinas: la del golfo de Méjico, la del golfo de Cádiz y la del estrecho de Gibraltar.

La zona sur mediterránea está dominada por las estribaciones de las Cordilleras Béticas, próximas a la costa que determinan unas llanuras costeras muy estrechas, a excepción de los valles de algunos ríos. El clima es templado cálido, con niveles de precipitación anual media que disminuye acusadamente desde el estrecho de Gibraltar hasta la costa oriental de Almería, con precipitaciones muy escasas y variables. Los ríos son cortos con regímenes de marcada estacionalidad, algunos son corrientes efímeras, pero con una aportación de sedimentos de gran intensidad en las avenidas.

Este sector de la costa se caracteriza por una gran diversidad de espacios naturales, desde acantilados, hasta llanuras aluviales y deltas. Destaca el mar de Alborán, con una notable diversidad biológica de especies tanto mediterráneas como atlánticas. A los diversos procesos (físicos, químicos y biológicos) que tienen lugar en el intercambio entre el Atlántico y el Mediterráneo se asocian procesos de afloramiento en el estrecho de Gibraltar.

La costa mediterránea presenta un elevado porcentaje de playas. La condición de mar semicerrado influye de manera decisiva en sus características y se dan procesos de acumulación con frecuencia en la desembocadura de los ríos. En el Mediterráneo, a diferencia del Atlántico, no se producen mareas de entidad, y por consiguiente existe una ausencia de costa baja con grandes zonas de inundación por mareas. Las costas mediterráneas están afectadas por corrientes de talud (frías una buena parte del año) y por un prolongado periodo de estratificación. En el litoral catalán tenemos formas rectilíneas, abruptas y escarpadas, que contrastan con la gran llanura aluvial del delta del Ebro.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. DATOS

Para la realización de este trabajo se han utilizado varias bases de datos:

1. Para el análisis de la concentración de clorofila-a se utilizaron los datos del satélite OrbView-2 proporcionados por el sensor SeaWiFS. Este sensor ha sido diseñado para proporcionar a la comunidad científica datos cuantitativos sobre propiedades bio-ópticas del océano.

Concretamente, SeaWiFS proporciona datos sobre el color de la superficie de los océanos, de los que puede derivarse información sobre la concentración de diversos pigmentos como la clorofila, que está directamente relacionada con el contenido en fitoplancton. Este tipo de información es útil no sólo para actividades como la pesca, sino que tiene un papel fundamental a la hora de estudiar el ciclo global del carbono.

SeaWiFS es un instrumento basado en el Coastal Zone Color Scanner (CZCS) que operó en el satélite Nimbus-7 entre 1978 y 1986. La selección de sus bandas se ha basado en las características espectrales de algunos constituyentes ópticos del agua y la transmitancia espectral del oxígeno y el vapor de agua atmosféricos. De los ocho canales que tiene el sensor, seis de ellos operan en la banda visible: 3 en el azul (B), 2 en el verde (G) y uno en el rojo (R). Los dos canales restantes operan en la zona del infrarrojo cercano. El interés científico en la coloración de los océanos se debe a que en la mayoría de ellos el color (en la región visible del espectro) varía con la concentración de clorofila y otros pigmentos presentes en el agua (por ejemplo, cuanto más fitoplancton contenga el agua, más verde estará).

SeaWiFS transmite de dos modos: datos LAC (Local Area Coverage) y datos GAC (Global Area Coverage). Los datos LAC se transmiten de forma continua y tienen una resolución de 1,2 km en una franja de 2800 km de ancho. Los datos GAC se almacenan a bordo y se envían a la estación terrena de Wallops Flight Facility (situada en la Costa Este de Virginia - USA) cada 12 horas. Los GAC se obtienen submuestreando los LAC, presentando una resolución de 4 km en una franja de 1.500 km. Para este estudio se han considerado los datos de Nivel 3 proporcionados por la NASA's Goddard Space Flight Center (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>) en los que los datos han sido "agrupados" espacialmente en celdas de 9 kilómetros de resolución que abarcan todo el mundo y temporalmente en periodos de 8 días.

2. Los datos de temperatura superficial del mar han sido obtenidos del radiómetro AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Este sensor fue diseñado para la observación meteorológica (determinación de cobertura de nubes y temperatura de la superficie), pero posteriormente los datos que suministra han encontrado numerosas aplicaciones en el campo de la Observación de la Tierra, lo que ha llevado a convertir al sensor AVHRR en una de las fuentes de datos de Teledetección más utilizadas.

Su escáner tiene un barrido de banda ancha, capaz de medir radiación en diferentes zonas del espectro electromagnético. Al obtener una misma imagen en diferentes longitudes de onda se puede hacer un análisis multiespectral para definir con gran precisión parámetros hidrológicos, oceanográficos y meteorológicos. Los datos utilizados tienen una resolución espacial de 4 kilómetros y temporal de 8 días para el periodo 1998-2007.

3. La base de datos escogida para obtener el viento a 10 m de altura es el Reanálisis NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) para el periodo 1998-2007 (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>), contando con una resolución espacial de 0.5°. Esta base de datos corresponde a un Reanálisis NCEP relativamente nuevo. Ha sido presentado en enero del 2010 para el periodo de 31 años que va de 1979 a 2009. Es un sistema global de alta resolución que acopla atmósfera, océano, superficie terrestre y hielo marino. Esta guía de datos climáticos proporciona información concisa de los principales conjuntos de datos observacionales, herramientas y métodos utilizados para evaluar los modelos del sistema terrestre y para entender el sistema climático. En el futuro el CFSR se convertirá en un producto operacional a tiempo real. Las nuevas características del CFSR incluyen: 1) acoplamiento de la atmósfera y el océano durante la generación del campo estimado de 6-h, 2) un modelo de mar helado interactivo, y 3) asimilación de las radiancias de satélite con un esquema de interpolación estadística Gridpoint (GSI) para todo el periodo. La resolución atmosférica es de ~38 km (T382) con 64 niveles que van desde la superficie a 0.26 hPa. En el océano la resolución latitudinal va de 0.25° en el ecuador a 0.5° más allá de los trópicos, con 40 niveles que se extienden a una profundidad de 4737 m. El modelo de tierra tiene 4 niveles de suelo y el mar helado 3 capas. La mayoría de observaciones satelitales e in situ disponibles han sido incluidas en el CFSR. Las observaciones de satélite han sido usadas en forma de radiancia. Este procedimiento ha permitido transiciones más suaves de los registros climáticos debidas a cambios evolutivos en el sistema de observación por satélite.

Las salidas de los diferentes productos del CFSR se encuentran disponibles con una resolución temporal horaria y una resolución espacial de 0.5° latitud × 0.5° longitud. Análisis preliminares del CFSR indican que se trata de un producto que es muy superior en muchos aspectos a los reanálisis de mediados de 1990. Los anteriores reanálisis

NCEP-NCAR han sido uno de los productos más utilizados de la historia del NCEP, sin embargo se espera que el CFSR sustituirá a estos productos por su mayor resolución tanto espacial como temporal y porque además cubre la atmósfera, el océano, el hielo del mar y la tierra (Saha et al., 2010).

4. Por último también se han utilizado datos del caudal de los principales ríos que desembocan en la Península Ibérica. (Miño, Duero, Mondego, Tajo y Ebro). Estos datos han sido obtenidos a partir de diferentes bases de datos de acuerdo a su disponibilidad. Los datos del río Miño han sido proporcionados por la Confederación Hidrográfica Miño-Sil (<http://www.chminosil.es>). Los datos del Duero, Mondego y Tajo fueron extraídos del Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (<http://www.snirh.pt/>). Y por último, los datos pertenecientes al río Ebro se obtuvieron de la Red Nacional de Estaciones de Aforo (<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>). En la figura 3.1 se representan las series mensuales de dichos caudales.

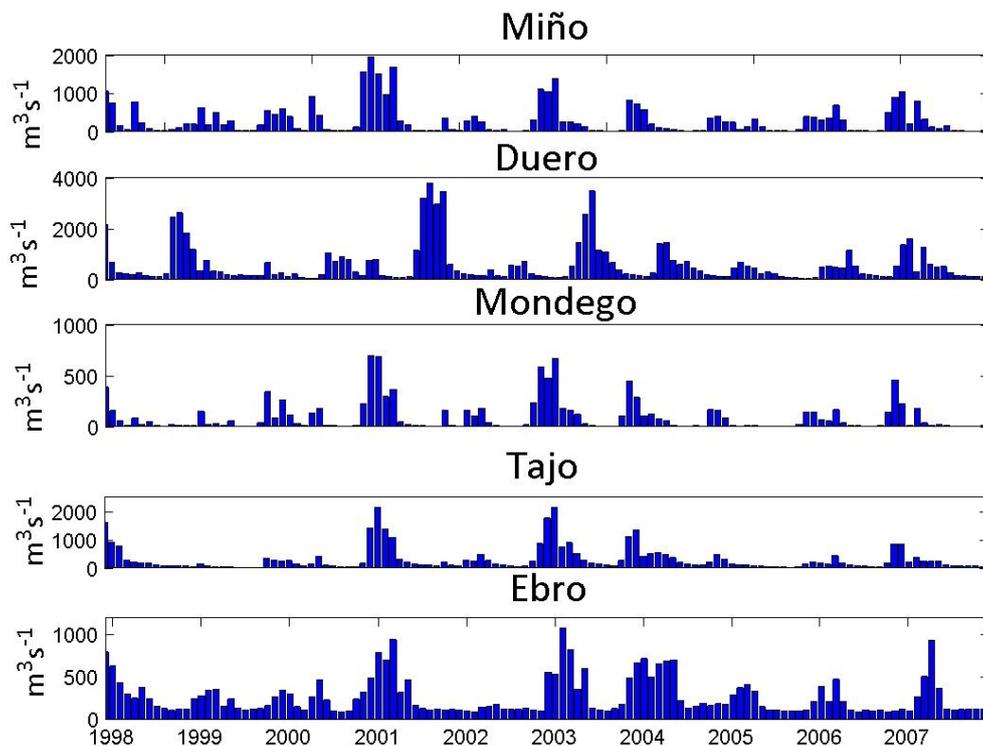


Figura 3.1 Series mensuales del caudal de los ríos Miño, Duero, Mondego, Tajo y Ebro para el periodo 1998-2007.

En este estudio podría echarse en falta el río Guadiana y Guadalquivir pero la falta de datos para el periodo de estudio nos ha obligado a prescindir de ellos. No obstante a la vista de la figura 3.2 podemos observar que el régimen de dichos ríos, menos caudalosos que los considerados, presenta una tipología similar a la de los ríos estudiados con mayor caudal en los meses de invierno y caudales mínimos en los meses de verano.



Figura 3.2 Gráfica de los caudales medios de los principales ríos de la red fluvial de la Península ibérica. (<http://adevaherranz.es/Geografia/ESPANA/FISICA/RED%20FLUVIAL>).

3.2 MÉTODOS

Para analizar la distribución mensual de las distintas variables consideradas (concentración de clorofila-a, temperatura superficial del mar y viento) calculamos la media mensual de cada una de ellas para el periodo 1998-2007 y elaboramos los mapas mensuales. Los datos de cada mes fueron obtenidos a partir de los datos semanales (8 días) obtenidos de las distintas bases de datos mencionadas en la sección 3.2.

Posteriormente, a partir de las medias mensuales de clorofila, se calcularon las medias anuales para el periodo 1998-2007 en las cuatro áreas en las que se dividió la Península Ibérica. Las series fueron suavizadas llevando a cabo una media móvil a 5 vecinos. También se calcularon las anomalías mensuales de concentración de clorofila para cada una de las zonas. La anomalía mensual de concentración de clorofila es un indicador destinado a expresar el comportamiento de un mes en relación con el que se considera normal para dicho mes. Resulta de restarle a la concentración media de clorofila del mes objeto de cálculo la concentración media de dicho mes para el periodo 1998-2007. Valores positivos del indicador indican concentraciones superiores

a las normales en ese mes mientras que valores negativos denotan concentraciones inferiores a las normales.

$$A[Chl_a]_{mes} = [Chl_a]_{mes} - \overline{[Chl_a]_{mes}}$$

donde $A[Chl_a]_{mes}$ es la anomalía de la concentración de clorofila del mes, $[Chl_a]_{mes}$ la concentración media mensual de clorofila del mes y $\overline{[Chl_a]_{mes}}$ la concentración media de clorofila del mes en el periodo 1998-2007.

Con las series de anomalías obtenidas se ha calculado la tendencia de concentración de clorofila en el periodo 1998-2007 para las 4 regiones de estudio. La tendencia es un componente que reviste gran interés, ya que refleja la evolución a largo plazo de la serie histórica. La obtención de la misma exige disponer de una serie larga y de un cierto número de ciclos completos, para que no se vea influida por la fase del ciclo en que finaliza la serie. Por ejemplo, lo que parece tendencia en una serie mensual de duración 2 años, puede ser parte de un ciclo de 4 años, ciclo que sólo podremos aislar con un mínimo de 12 ó 16 años de observaciones. De entre los múltiples métodos que permiten determinar la tendencia: método de los puntos medios, método de las medias móviles, método analítico de los mínimos cuadrados, método de las dos medias; se ha elegido el de mínimos cuadrados. La ventaja de este método radica en que permiten predecir el comportamiento de la variable Y en el futuro en base a su comportamiento observado, como consecuencia de que, al venir dada la línea de tendencia por una ecuación, es posible extrapolar para distintos valores de la variable T (tiempo). Evidentemente, cuanto más próximo sea el futuro que quiera predecirse, mayor fiabilidad tendrán los valores predichos.

En este método una vez representada la serie, se ajustará por mínimos cuadrados a la línea más conveniente, hallándose también la medida de la bondad o representatividad del ajuste correspondiente. Éste es uno de los métodos más exacto y, por tanto, el más usado.

En las series temporales, haremos el siguiente cambio de variable (pues los valores de t son correlativos):

Si el número de valores de t es impar: $t' = t - Ot$ (donde Ot es el valor central de la serie de valores de t). Si el número de valores de t es par: $t' = 2 \times (t - \ddot{O}t)$ (donde $\ddot{O}t$ es la media de los dos valores centrales de la serie de valores de t).

En ambos casos, el sistema de ecuaciones normales para ajustar una recta serían:

$$y = a + bt' \begin{cases} \sum y_i = aN \\ \sum t'_i y_i = b \sum t_i'^2 \end{cases} \quad N = \text{Número de observaciones.}$$

Con los datos de descarga de los principales ríos de cada una de las áreas de estudio se calculó el régimen fluvial de los mismos (comportamiento del caudal de agua en promedio que lleva un río en cada mes a lo largo del año). Estos datos se compararon con la concentración de clorofila en la desembocadura de dichos ríos a lo largo del año.

Todo el tratamiento de datos llevado a cabo en este trabajo se hizo con el programa Matlab. MATLAB® es un lenguaje denominado de alto nivel que cuenta con un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales. (<http://www.mathworks.es>). Todos los resultados presentados en este trabajo han sido obtenidos tras escribir una serie de programas en Matlab que nos han permitido extraer y visualizar los datos de clorofila, temperatura superficial del mar y viento que se encuentran en formato hdf y netcdf, respectivamente (para más información de estos formatos puedes ir a la página <http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales>). Además también se utilizó Matlab para llevar a cabo el estudio estadístico y de tendencias de las series temporales de datos de clorofila y de caudal de los ríos. En la figura 3.3 se muestra una imagen del entorno gráfico usado para la elaboración de los cálculos y las imágenes del trabajo fin de grado.

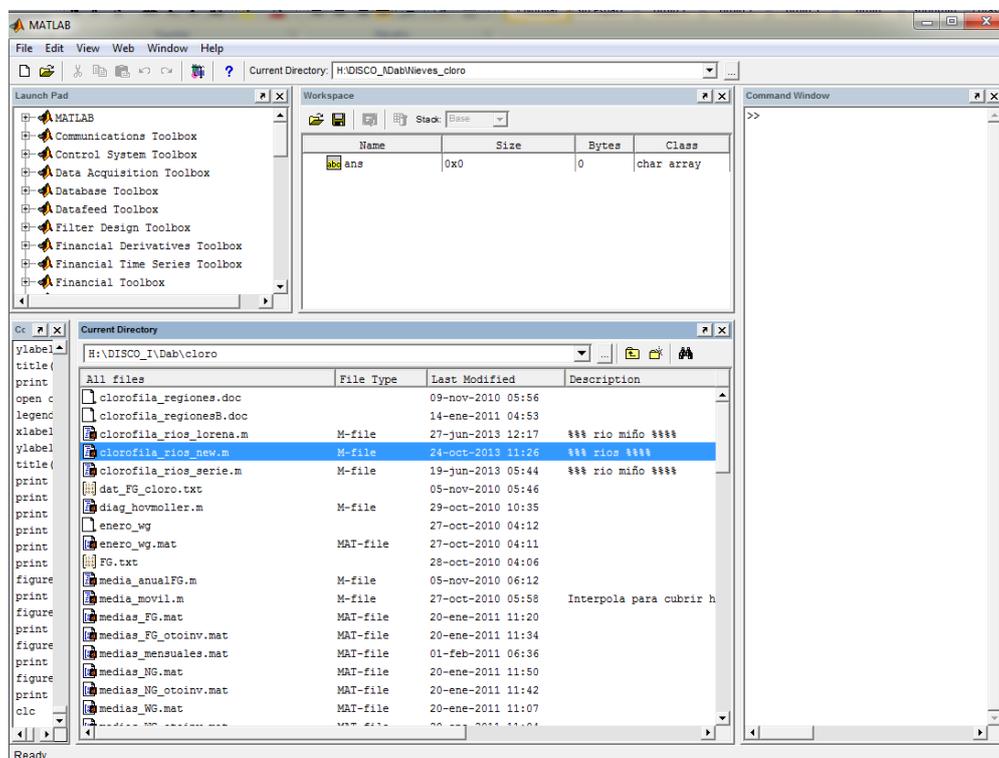


Figura 3.3 Entorno Gráfico del programa Matlab usado para la realización de este trabajo.

4. RESULTADOS

El promedio mensual de la concentración de clorofila-a a lo largo del litoral peninsular para el periodo 1998-2007 muestra una pronunciada variabilidad estacional (figura 4.1). Dicha variabilidad dependerá de la zona costera considerada.

En las cuatro áreas de estudio, se observa un máximo de concentración, más o menos intenso, en los meses de primavera que coincide con el *bloom* de fitoplancton característico de esta época del año. Sin embargo, dependiendo del área observada podemos encontrar otros máximos secundarios relacionados con los fenómenos de afloramiento producidos por las condiciones atmosféricas o por periodos de intensa descarga fluvial. Los máximos debidos a condiciones de afloramiento por efecto de los vientos propiciados por las condiciones atmosféricas, por regla general ocurren durante los meses de verano, y tienen lugar principalmente en el litoral Atlántico, que forma parte del sistema de afloramiento que se extiende a lo largo de la costa este del Atlántico Norte desde aproximadamente 7.5°N hasta 44°N. (Wooster et al., 1976). Este máximo de afloramiento se desplaza a los meses de otoño en la costa del Cantábrico y apenas se observa en la costa Mediterránea donde los puntos de máxima concentración de clorofila pertenecientes a la Península Ibérica se ven relegados a las zonas coincidentes con desembocaduras de ríos.

Este comportamiento se observa más claramente al representar el ciclo anual de concentración de clorofila-a lo largo de cada una de las zonas costeras analizadas. La figura 4.2 muestra el ciclo anual durante el periodo 1998-2007.

En la zona cantábrica destacan dos máximos, el primero en el Golfo de Vizcaya cercano a la costa de la Bretaña francesa durante el periodo de primavera como consecuencia del *bloom* de fitoplancton primaveral y el segundo en el litoral cantábrico gallego durante los meses de finales de verano principios de otoño como consecuencia de los afloramientos debidos a los vientos propiciados por las condiciones atmosféricas.

El litoral atlántico es el que mayores niveles de concentración presenta y también el que posee un máximo de afloramiento durante los meses de verano más elevado y extendido. En particular el litoral atlántico gallego y el norte de Portugal destacan junto con la costa frente al Cabo de Roca, cerca de Lisboa, por la intensidad de los valores de clorofila. El máximo característico del *bloom* de primavera también muestra valores más intensos que los observados en el resto de las zonas analizadas. Debemos recordar que el litoral atlántico forma parte del sistema de afloramiento de la costa este del Atlántico Norte.

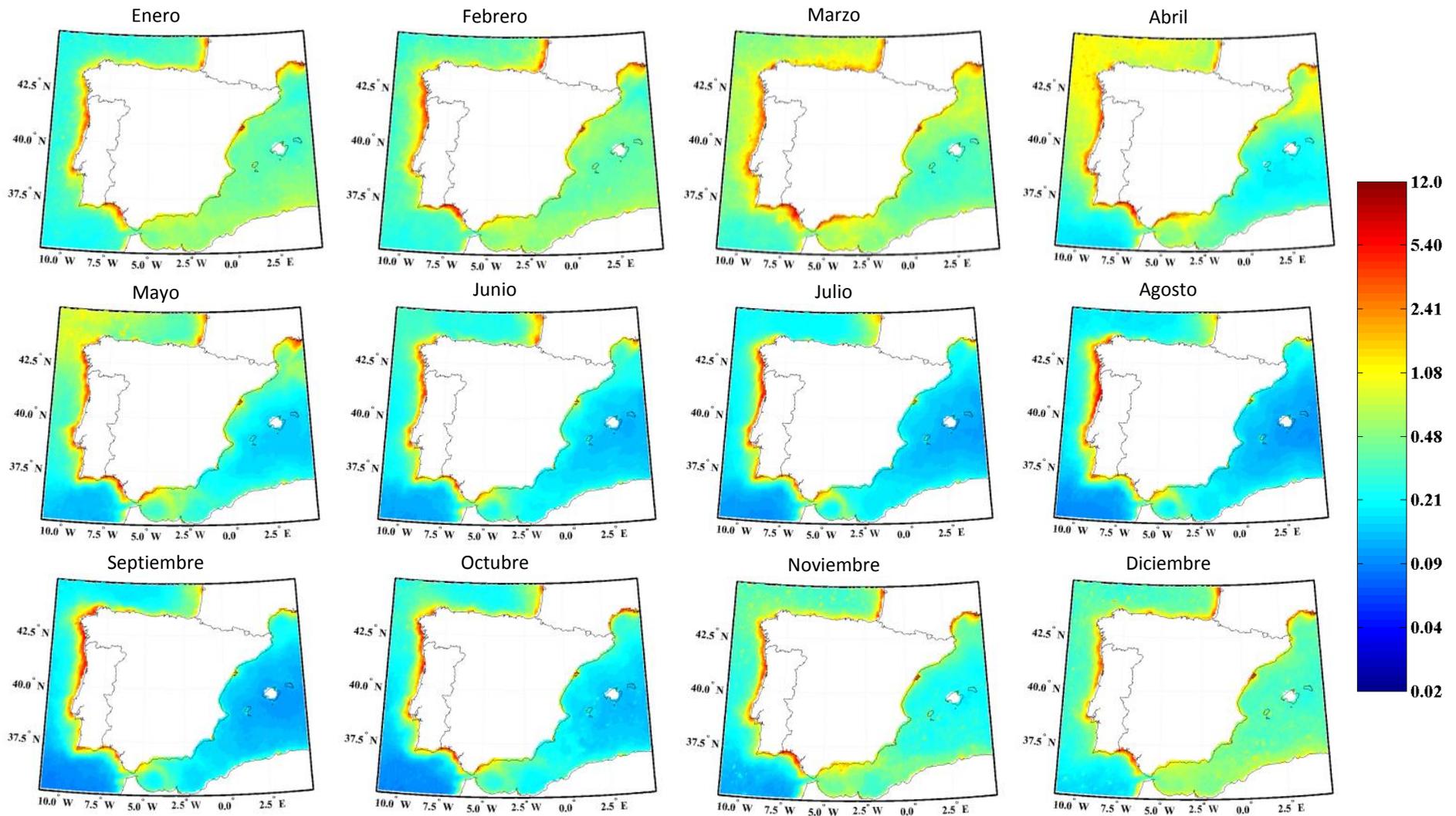


Figura 4.1 Distribución mensual de la concentración de clorofila-a (mg m^{-3}) para el periodo 1998 a 2007 a lo largo de la Costa de la Península Ibérica. Los colores corresponden a la concentración de Chl-a en escala logarítmica.

En el litoral sur de la Península Ibérica se observa que los máximos de concentración tienen lugar principalmente en los meses de primavera, coincidiendo con el *bloom* de fitoplancton primaveral, y en los de invierno debido al mayor caudal de los ríos. En cuanto a los primeros cabe destacar un máximo muy intenso de concentración de clorofila localizado en la región occidental del litoral en el golfo de Cádiz y otro de menor intensidad pero de valores significativamente mayores que los de su alrededor en el mar de Alborán localizado en el área oriental del litoral. Los máximos de invierno se encuentran fundamentalmente localizados en el litoral del área atlántica que recoge los caudales de ríos como el Guadiana y el Guadalquivir sensiblemente más caudalosos que los de la vertiente mediterránea.

En la zona del Mediterráneo, el máximo principal se localiza a la altura del río Ebro, esto explica que su intensidad sea mayor durante los meses de mayor descarga fluvial por parte del río. En el resto de la costa mediterránea peninsular apenas se observan variaciones importantes en la concentración de clorofila si bien es más intensa al norte del río Ebro que al sur.

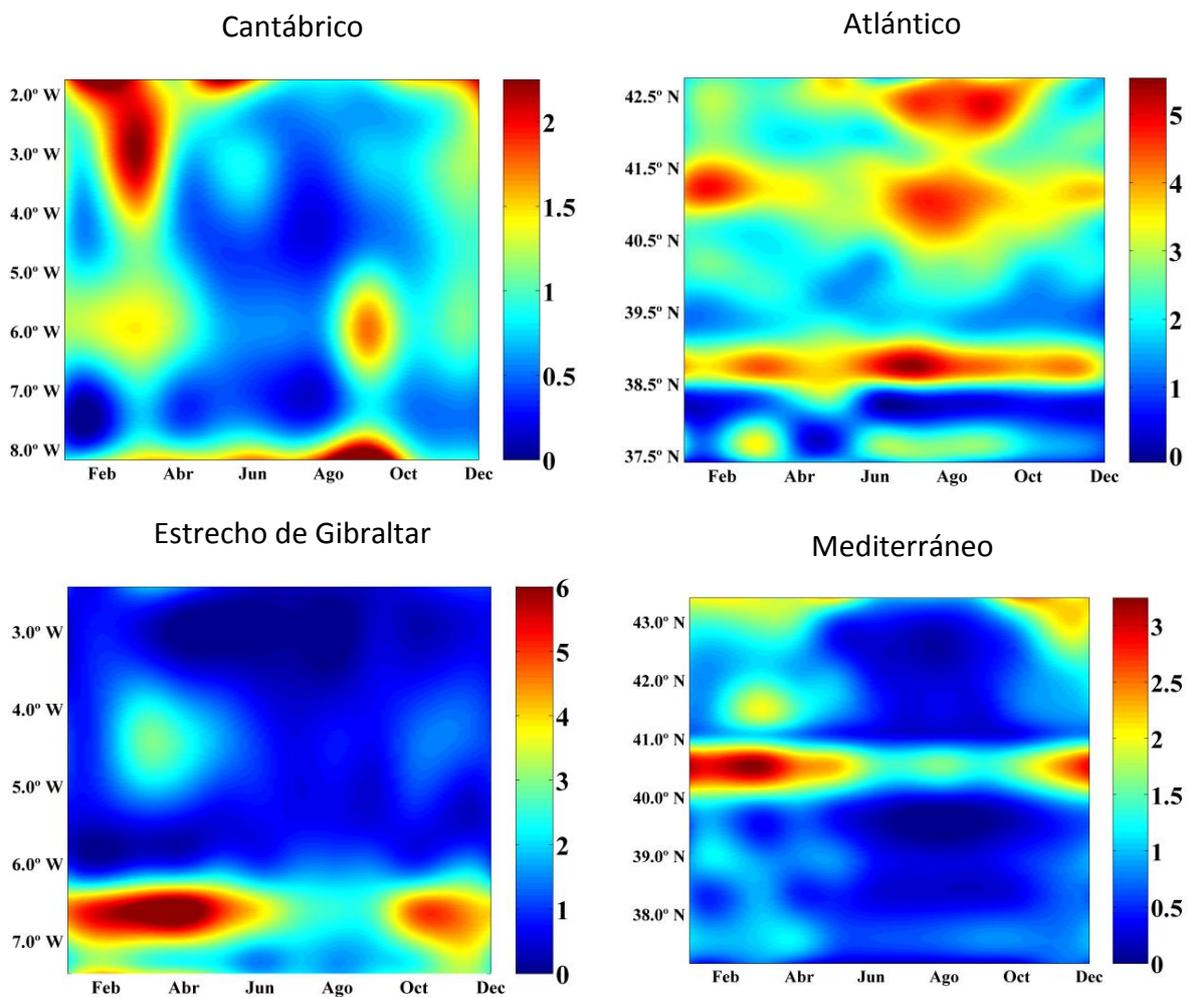


Figura 4.2 Ciclo anual de la concentración de clorofila-a ($mg\ m^{-3}$) desde 1998 a 2007 en las cuatro regiones mostradas en la figura 2.1.

La representación de las series temporales de clorofila para todo el periodo de estudio, 1998-2007, (figura 4.3) muestra que no se observan tendencias uniformes en la concentración de clorofila. En esta figura también se observa que la costa oeste es la que presenta valores de mayor intensidad sobre todo debidos a la contribución de los episodios de afloramiento de verano. Las regiones del Estrecho y del Mediterráneo muestran una pronunciada periodicidad debida a los afloramientos de primavera. Mientras que en el Cantábrico y en el Atlántico esa periodicidad es más irregular como consecuencia de los periodos de afloramientos de verano y otoño.

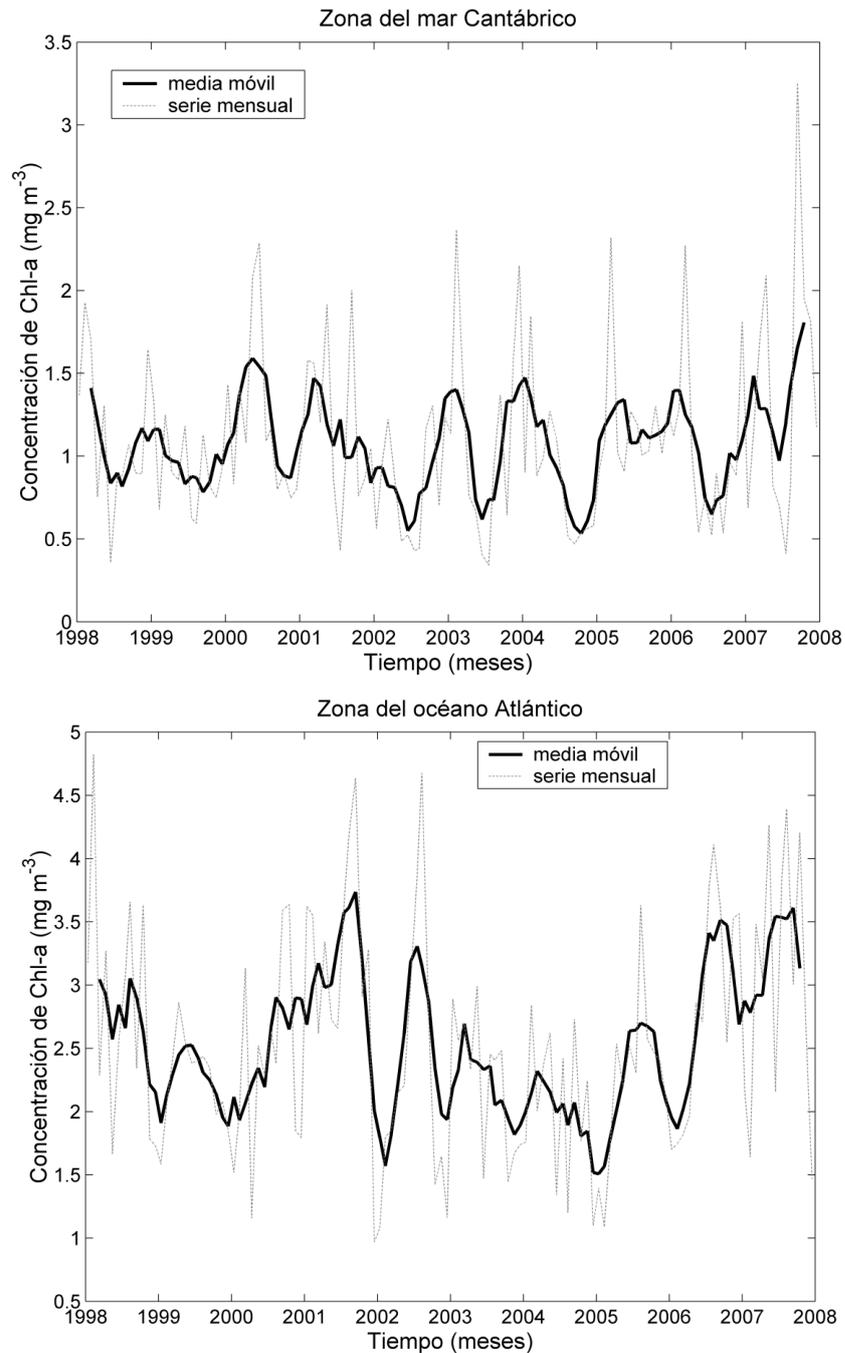


Figura 4.3 Series temporales y media móvil a cinco vecinos de la concentración de clorofila-a desde 1998 a 2007 en las cuatro regiones mostradas en la figura 2.1.

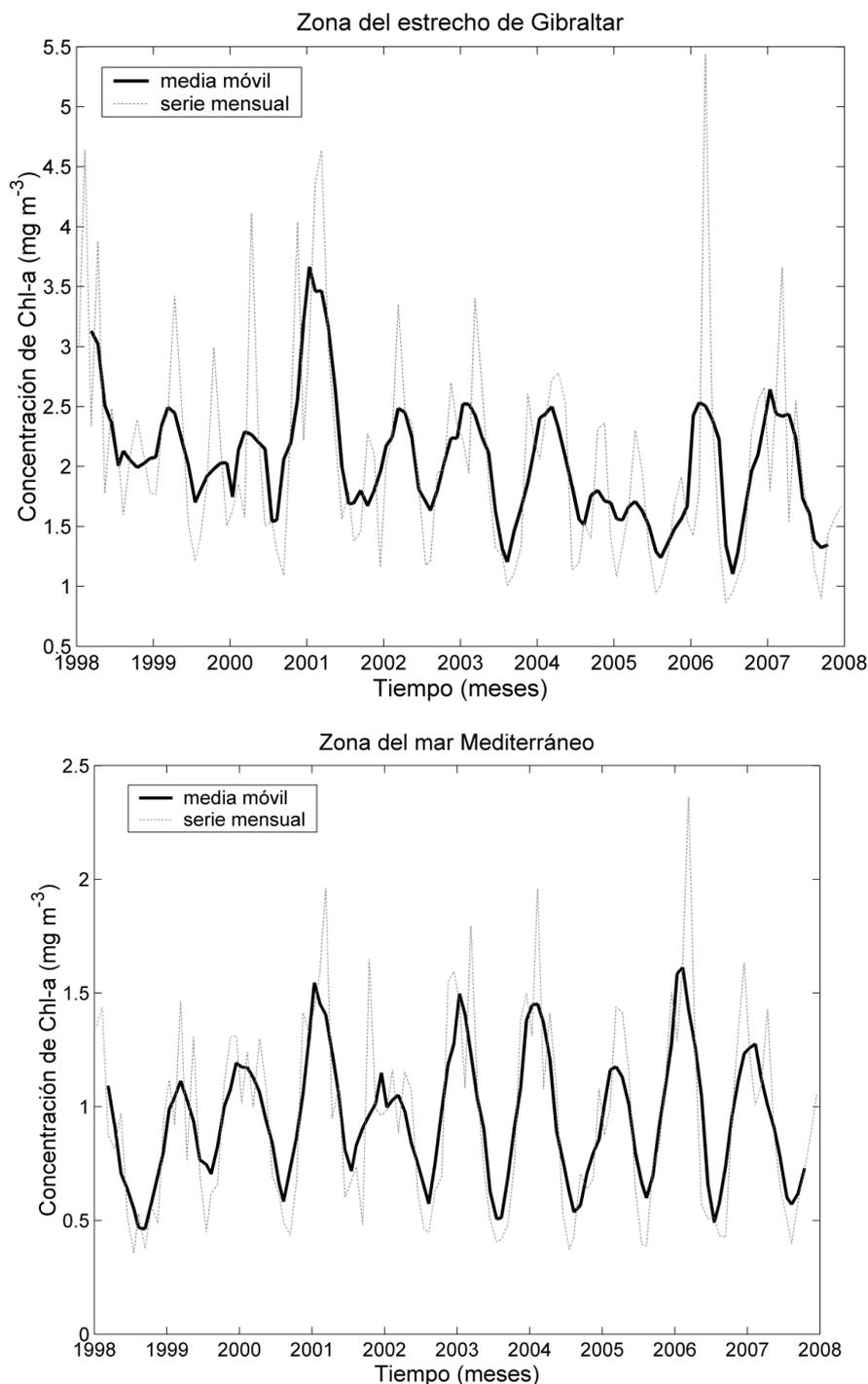


Figura 4.3 Continuación.

Dado que el comportamiento de la concentración de clorofila difiere según la estación del año, se ha dividido el periodo anual en dos estaciones, una propia de fenómenos de afloramiento, que engloba la primavera y el verano y otra caracterizada por la no presencia de dichos eventos, otoño-invierno. El análisis de la tendencia de concentración de clorofila en estos dos periodos para las cuatro áreas estudiadas, confirman la aleatoriedad de las tendencias para el periodo estudiado. Únicamente en el área del Estrecho de Gibraltar parece que se observa una disminución significativa

de la concentración de clorofila durante los meses de primavera-verano. En el resto de zonas o bien no hay una tendencia significativa o se da un aumento en la concentración de clorofila durante los meses de otoño-invierno lo que podría asociarse a una mayor descarga fluvial por parte de los ríos. Necesitaríamos series más largas de datos para evidenciar la existencia o no de tendencias significativas.

Tabla 4.1 Tendencias de Chl-a calculadas usando los valores de las anomalías mensuales para el periodo 1998-2007 en las cuatro regiones mostradas en la figura 2.1.

	Chl-a ($\text{mg m}^{-3} \text{ decada}^{-1}$)		
	Otoño-Invierno	Primavera-Verano	Año Completo
Cantábrico	0.29***	-0.19	0.12
Atlántico	-0.06	0.41	0.21
Estrecho de Gibraltar	-0.26	-0.88***	-0.58***
Mediterráneo	0.21**	-0.01	0.10**

** $p < 0.05$. *** $p < 0.01$.

Como se mencionó en la introducción (sección 1.1), la concentración alta de nutrientes en las aguas costeras puede ser debida también a una descarga masiva de agua en las desembocaduras de los ríos, de forma que no siempre los *blooms* de fitoplancton son debidos a condiciones de afloramiento producidas por los vientos. Para ver qué papel juegan los principales ríos de la península en la concentración de Chl-a observada en las zonas costeras de la península se han escogido 5 ríos, 4 en la zona atlántica y uno en el litoral mediterráneo y comparamos su régimen fluvial con la concentración anual de Chl-a que se observa cerca de su desembocadura (figura 4.4).

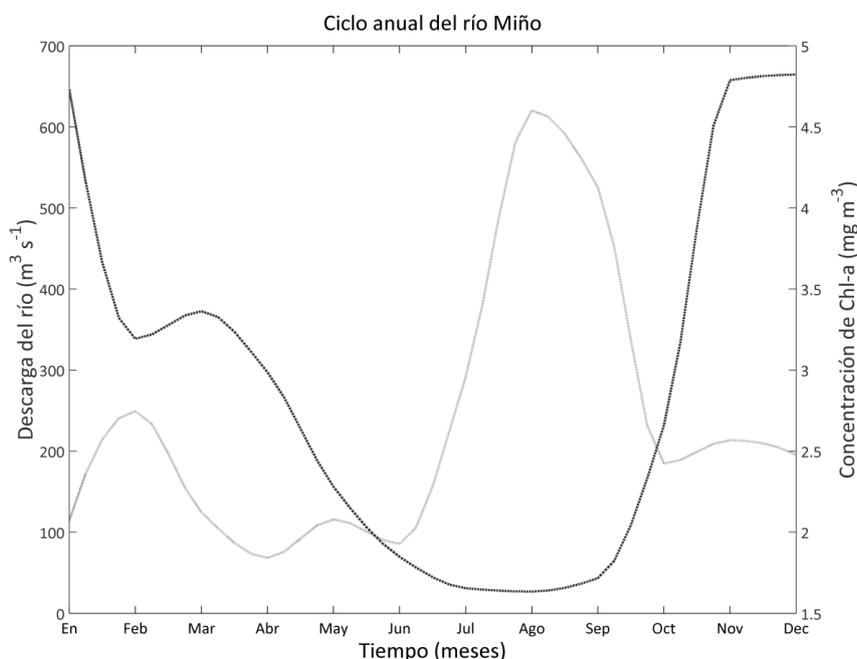


Figura 4.4 Concentración media anual de clorofila-a (mg m^{-3}) desde 1998 a 2007 en la desembocadura de los ríos (gris) y ciclo hidrológico anual del río ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) (negro).

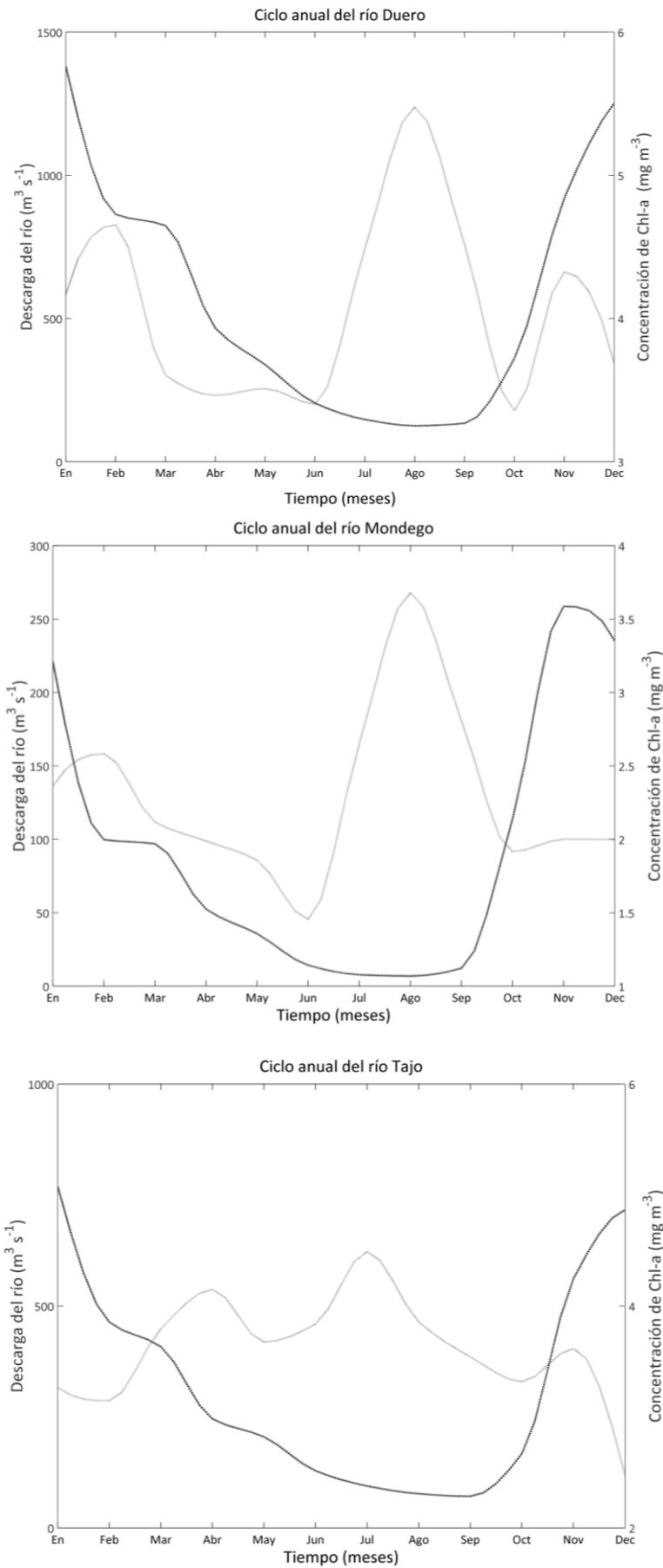


Figura 4.4 Continuación.

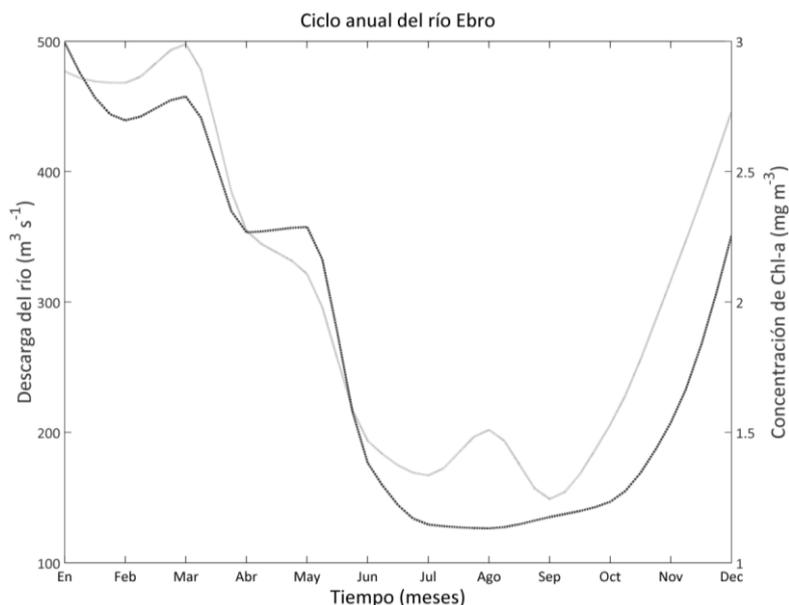


Figura 4.4 Continuación.

Un análisis detallado de la figura 4.4 nos muestra que en la región mediterránea la concentración de clorofila es fuertemente condicionada por el régimen fluvial con valores mínimos en la época de estiaje y máximos en el otoño y el periodo primaveral del deshielo. En la zona atlántica, sin embargo, los mayores valores de concentración de clorofila no ocurren en la época de mayor caudal de los ríos sino que tienen lugar en las épocas de estiaje, lo que confirma que dichos máximos de concentración de clorofila son consecuencia de los fenómenos de afloramiento provocados por los vientos propiciados por las condiciones atmosféricas que se dan en verano en dicha región. En la región del estrecho de Gibraltar el comportamiento es muy similar al observado en el costa mediterránea, pues no se observa el máximo de afloramiento de verano (ver figura 4.3) y solo se detectan los picos del *bloom* de primavera. Un comportamiento similar es observado en la zona Cantábrica donde la descarga de los ríos también afecta a la concentración de *Chl-a* en las zonas costeras de la desembocadura (Novoa et al., 2012).

Al igual que se hizo en la tabla 4.1 también se estudió la existencia de tendencias en la concentración de Chl-a observada en las desembocaduras de los ríos considerados en este estudio.

De la misma manera que se observó en la tabla 4.1 no parece darse un acuerdo en las tendencias de clorofila. Mientras en la desembocadura del Duero se observa un aumento de Chl-a que también parece darse en la desembocadura del Tajo durante el periodo de primavera-verano, en el río Mondego y en el Ebro la tendencia parece ser la contraria, es decir la concentración de clorofila tiende a disminuir. Dichas tendencias

podrían estar relacionadas con los programas establecidos de control de la contaminación en los ríos y que han mejorado notablemente la calidad del agua de los estuarios durante los últimos años. Otra razón para la disminución de Chl-a, podría ser el aumento de materia en suspensión relacionada con el aumento de caudal de los ríos, lo que podría haber causado una disminución de la claridad del agua y, por tanto, afectado el crecimiento del fitoplancton (Iriarte y Purdie 2004; Butrón et al. 2009). Lo que se necesita para analizar mejor este comportamiento variable son series más largas de puntos y contrastar los resultados con medidas in situ de clorofila.

Tabla 4.2 Tendencias de Chl-a calculadas usando los valores de las anomalías mensuales de concentración de clorofila en la desembocadura de los cinco ríos considerados en la figura 2.1.

Ríos	Chl-a ($\text{mg m}^{-3} \text{decada}^{-1}$)		
	Otoño-Invierno	Primavera-Verano	Año Completo
Miño	-0.40	-0.52	-0.44
Duero	0.82	1.08**	0.97***
Mondego	0.53	-1.09**	-0.21
Tajo	-0.22	0.73**	0.19
Ebro	0.04	-0.41**	-0.22

** $p < 0.05$. *** $p < 0.01$.

Para analizar mejor las condiciones oceánicas se han analizado los promedios mensuales de la temperatura de la superficie del mar (SST). Podemos ver dichos promedios en la figura 4.5. La SST presenta una alta variabilidad anual. En invierno (diciembre-marzo) las temperaturas más frías se encuentran en la mitad norte Peninsular, más acusadas si cabe en la zona oeste. En enero se observa un filamento de agua más cálida que las aguas costeras y que las aguas oceánicas girando hacia el este en el Cabo de Finisterre. Esta agua corresponde a la Iberian Poleward Current (IPC) que llega al Cantábrico cada invierno. Estas aguas de origen subtropical se caracterizan por ser más cálidas y salinas que las aguas de la zona Cantábrica que son de origen subpolar (García-Soto et al., 2002; deCastro et al., 2011).

En febrero es posible observar cerca de la costa oeste una lengua de aguas más frías. Esta puede ser debida a algún evento de afloramiento o también por las aguas más frías provenientes de las plumas de los ríos más activos en esta época del año. Lo que explicaría la concentración de Clorofila observada en febrero (figuras 4.1 y 4.2).

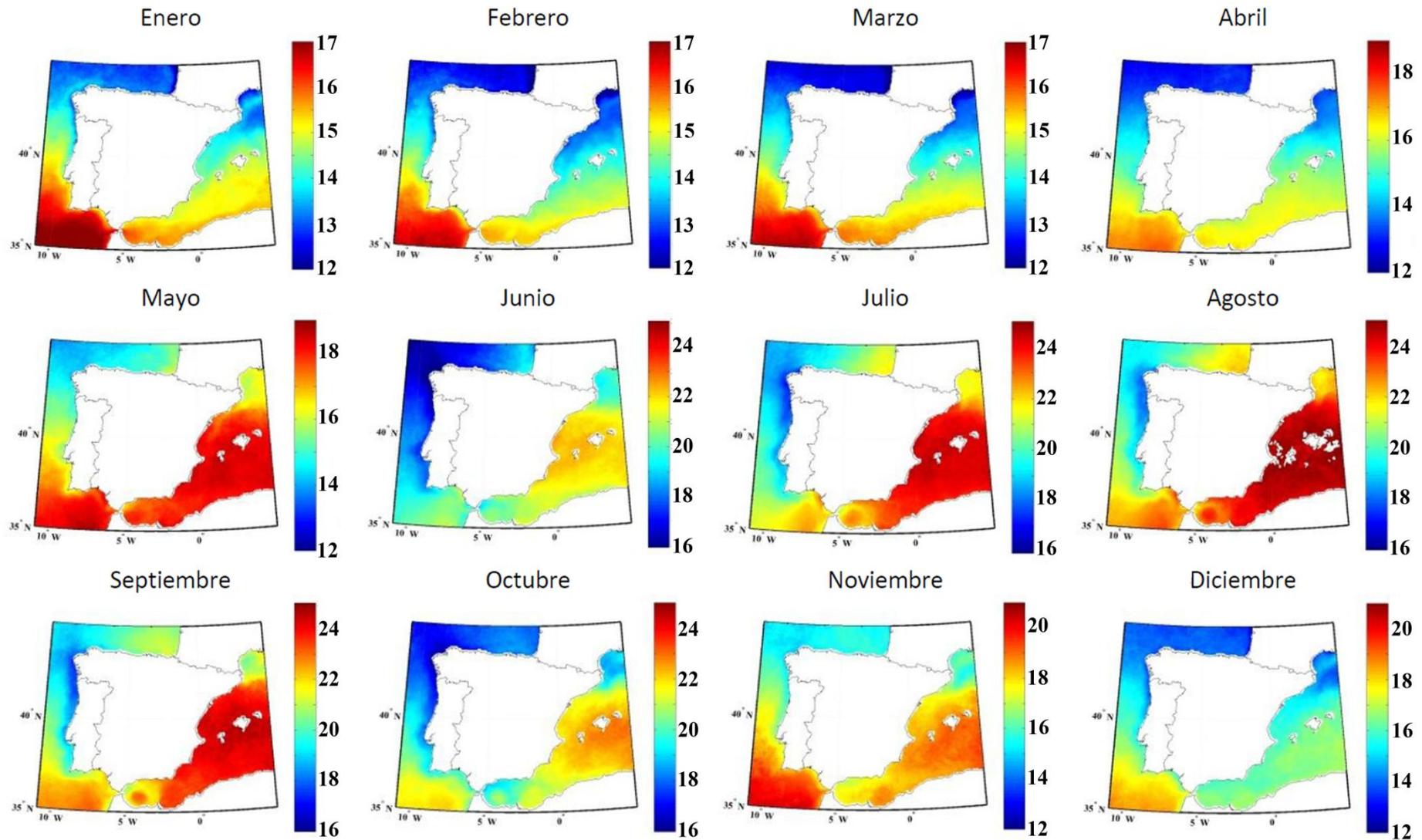


Figura 4.5 Distribución mensual de la temperatura superficial del mar (SST) en °C para el periodo 1998 a 2007 a lo largo de la Costa de la Península Ibérica.

Marzo marca la transición a la primavera, lo que se observa con la llegada de aguas más cálidas provenientes de latitudes más bajas. Esto se mantiene en abril y mayo. Durante este periodo es cuando se observa el *bloom* primaveral que afecta a toda la costa peninsular en mayor o menor medida (figuras 4.1 y 4.2).

De junio a septiembre las temperaturas más elevadas se observan en la costa mediterránea seguidas del litoral sur y la zona más oriental del Golfo de Vizcaya, localizado en la costa Cantábrica (Gomez-Gesteira et al., 2008). En la costa atlántica se observa un gradiente longitudinal de temperatura con aguas costeras más frías que las oceánicas. Esto es debido a los intensos vientos de componente norte que afectan esta costa durante el verano (figura 4.6) y que producen condiciones favorables de afloramiento debido al viento (figura 4.7), esto explica las concentraciones altas de clorofila observadas en este periodo (figuras 4.1 y 4.2).

Octubre marca la transición al otoño, esto se observa en la figura 4.5 con un fuerte enfriamiento en todo el litoral. Esto es consecuencia de la entrada de aguas procedentes de latitudes más altas y a agua enfriada como resultado de la pérdida neta de calor de la superficie. En noviembre y diciembre se observa una banda de aguas más frías próxima a la costa Atlántica, esto puede ser atribuido a la presencia de algún evento de afloramiento invernal o de nuevo a las plumas de los ríos que presenta una mayor descarga durante estos meses.

Además, para comprender la aparición y variabilidad de la concentración de clorofila-a lo largo de la costa también se han analizado las condiciones atmosféricas con la ayuda del viento (figura 4.6) y del transporte de Ekman (figura 4.7).

Los patrones mensuales de ambas variables muestran que la zona del litoral atlántico, durante los meses de primavera-verano, es la que presenta unas condiciones más favorables a la ocurrencia de fenómenos de afloramiento debidos al viento por ser los meses de mayor intensidad en dicha zona (observa que Julio y agosto tienen una escala mayor) y además viento norte, lo que da lugar un transporte de Ekman favorable al afloramiento. Estos resultados están en acuerdo con lo observado en las distribuciones mensuales de clorofila (figura 4.1) y en los mapas mensuales de SST (figura 4.5), donde se observaban aguas relativamente frías bordeando el litoral atlántico en los meses de verano. En los meses de invierno, los vientos de componente norte son menos intensos y aparecen vientos de componente oeste y sur que dificultan la aparición de un transporte de Ekman favorable para la ocurrencia de fenómenos de afloramiento, sin embargo estos vientos de componente oeste y sur suelen venir acompañados de frentes que provocan precipitaciones moderadas en la zona y consecuentemente arrastre de nutrientes de tierra a costa en las desembocaduras de los ríos, lo que puede explicar la aparición de picos de clorofila en este periodo.

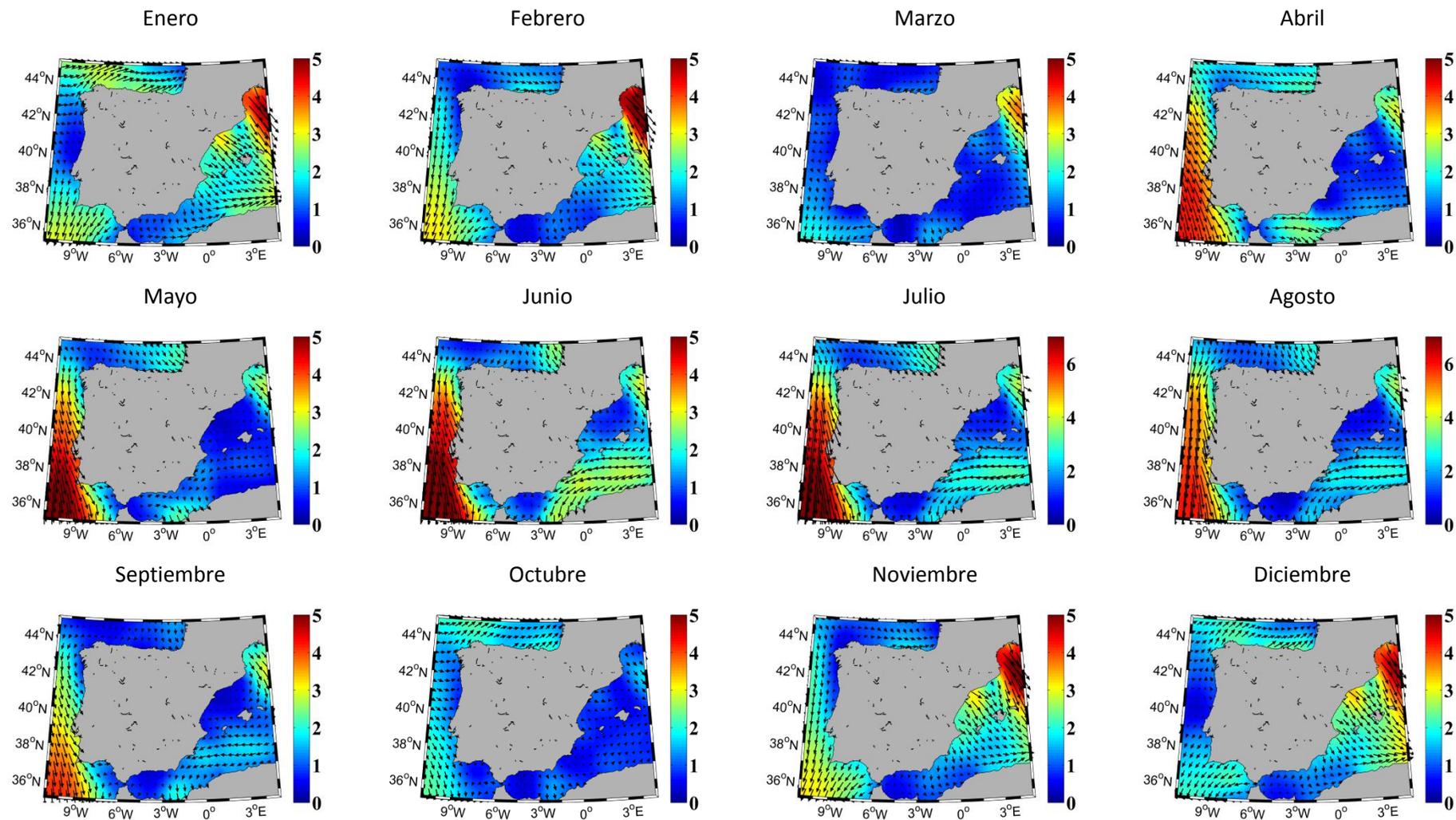


Figura 4.6 Distribución mensual del viento (velocidad en $m s^{-1}$) para el periodo 1998 a 2007 a lo largo de la Costa de la Península Ibérica.

En el litoral cantábrico la velocidad del viento es menor, destacando el mes de enero como el más ventoso, seguido de diciembre, abril y octubre. En los meses de verano el viento de esta zona también presenta una componente norte acusada que hace que en la zona oeste del litoral se produzcan eventos de afloramiento debidos al viento aunque no tan intensos ni persistentes como los que ocurren en el litoral atlántico. El resto del año los vientos varían manteniendo una componente oeste.

La zona del estrecho de Gibraltar es un área compleja debido a que se encuentra influenciada por el océano Atlántico y el mar Mediterráneo. Los vientos que dominan en el Estrecho son de levante y de poniente. El viento de levante sopla con gran frecuencia en el mar de Alborán hacia el estrecho de Gibraltar y suele darse entre los meses de junio a agosto con mayor fuerza. El viento de poniente afecta sobre todo al golfo de Cádiz y se da con mayor intensidad entre noviembre y marzo. No se observa afloramiento en los meses de verano, curiosamente al contrario de lo que ocurre en la costa oeste. Las menores concentraciones de clorofila se dan en esta época para esta región.

Por último en la costa mediterránea podemos considerar dos regímenes de viento distintos, uno se corresponde con el periodo comprendido entre noviembre y marzo, en el que nos encontramos vientos del noroeste en todo el litoral, los cuales son mucho más intensos en el norte, junto a la costa francesa. El otro se corresponde con los meses de junio a septiembre, en los que nos encontramos vientos del noreste en la zona sur, manteniéndose la dirección noroeste en el norte, aunque con menor intensidad y vientos flojos en el resto del litoral. En ninguno de los casos se observa un transporte de Ekman favorable a la ocurrencia de eventos de afloramiento debidos al viento. Esto explica la inactividad con respecto a la concentración de clorofila de esta costa en relación a las demás. Tan sólo destacan los picos debidos a las plumas de los ríos en sus periodos de máxima descarga (figuras 4.1 y 4.4).

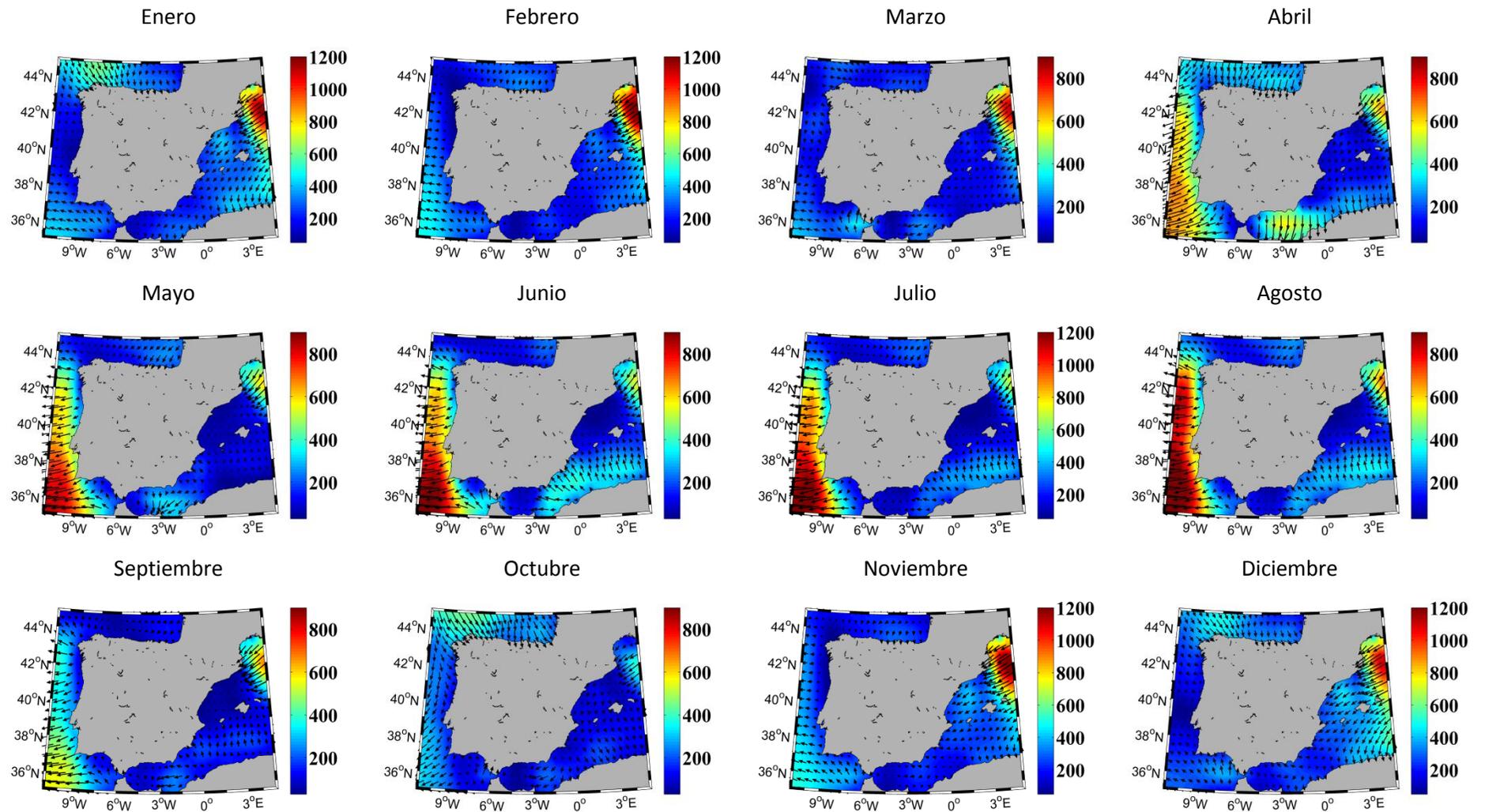


Figura 4.7 Distribución mensual del transporte de Ekman ($m^3 s^{-1} km^{-1}$) para el periodo 1998 a 2007 a lo largo de la Costa de la Península Ibérica.

5. CONCLUSIONES

En el presente documento se analiza la distribución espacial y temporal de la concentración de clorofila-a a lo largo de la costa de la Península Ibérica.

Por lo general la concentración de Chl-a es mayor cerca de la costa atlántica y tiene una gran variabilidad estacional.

En la costa cantábrica destacan dos máximos, uno en los meses de primavera debido al bloom primaveral, y otro en verano en la costa cantábrica gallega, debido fundamentalmente al afloramiento estival que se produce en esta área.

En la zona atlántica, también con dos máximos claros de concentración a lo largo del año, destaca por la intensidad su máximo estival. Esta zona pertenece al sistema de afloramiento de la costa este del Atlántico Norte. Es por esto que sus valores de concentración de clorofila son superiores al resto de las áreas estudiadas.

En el litoral del estrecho destaca un máximo muy intenso de concentración de clorofila debido al *bloom* primaveral localizado en la región occidental del litoral en el golfo de Cádiz y otro de menor intensidad en el mar de Alborán localizado en el área oriental del litoral. Pero no se observan picos importantes de clorofila en los meses de verano debido al afloramiento costero. En esta área es de destacar la concentración de clorofila en invierno. Estos picos son en su mayor parte debidos a los nutrientes arrastrados por los caudales de los ríos en esta época del año.

En la costa mediterránea apenas se observan valores importantes de concentración de clorofila. Cabe destacar la aparición de un máximo de clorofila entorno a la desembocadura del río Ebro. Este máximo se acentúa en los meses de mayor caudal del río, principalmente en invierno y primavera.

En el litoral sur y este peninsular la concentración de clorofila presenta un patrón marcado por el bloom primaveral de ahí el aspecto periódico que presentan las series temporales de clorofila. Este patrón se hace más irregular en el litoral cantábrico y atlántico donde al bloom de primavera hay que añadir los afloramientos debidos al viento que no siempre presentan la misma regularidad ni la misma intensidad al estar sometidos a las condiciones meteorológicas de cada año.

Observando la descarga de los ríos, vemos que en el Mediterráneo la concentración de clorofila está condicionada fuertemente por ésta. En el Estrecho la situación es similar aunque destaca también el bloom primaveral. Podemos observar un comportamiento parecido en la zona cantábrica. Sin embargo el área atlántica se diferencia de las demás áreas debido al régimen de vientos que se instala en esta zona en verano,

propiciando el afloramiento y dando lugar a la mayor concentración de clorofila que presenciamos en las costas de la Península Ibérica.

Para el periodo de estudio 1998-2007 no se observan en general tendencias significativas salvo en la zona del estrecho de Gibraltar donde se observa una disminución de la concentración para los meses de primavera y verano que hace que dicha disminución se observe también en el promedio anual. Si focalizamos el estudio de las tendencias sobre las desembocaduras de los ríos estudiados, observamos que mientras en el Duero y en el Tajo hay una tendencia positiva durante el periodo primavera – verano, en las desembocaduras del Mondego y el Ebro la concentración de Chl-a presenta una tendencia negativa. La tendencia positiva puede ser debida a una mayor caudal de los ríos, mientras que la tendencia negativa puede ser debida al control de la calidad del agua que se ha llevado a cabo en los últimos años en algunas cuencas, lo que disminuye la contaminación de los estuarios o también, por el aumento de la materia en suspensión que disminuye la claridad del agua y por lo tanto, el crecimiento del fitoplancton.

En conclusión podemos decir que el afloramiento costero debido al viento, se encuentra casi exclusivamente restringido a la costa atlántica. Este fenómeno provoca que las aguas superficiales se retiren de la costa (transporte Ekman), de forma que las aguas frías y ricas en nutrientes de las profundidades asciendan para ocupar su lugar, dándose las condiciones idóneas para una mayor producción de clorofila-a. Esto convierte la costa del océano Atlántico y mar Cantábrico en aguas ricas en fitoplancton con proliferación de numerosas especies muy apreciadas en pesca. En el resto del litoral de la Península Ibérica nos encontramos con ecosistemas también de gran importancia biológica, pero no debida a los afloramientos si no a otras características específicas de cada una de ellas.

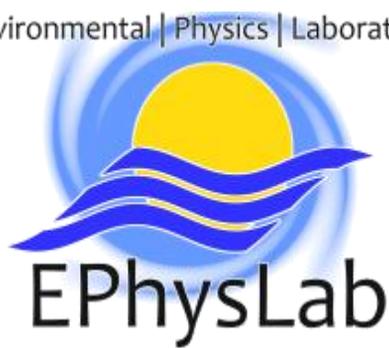
Bibliografía

- Álvarez Fernández, M. I. 2005. Hidrografía e hidrodinámica de los estuarios gallegos bajo la influencia de forzamientos externos. Tesis doctoral. Universidade de Vigo.
- Álvarez, I., Lorenzo, M.N. and deCastro, M. 2012. Analysis of chlorophyll *a* concentration along the Galician coast: seasonal variability and trends. ICES Journal of Marine Science 69 (5), 728-738.
- Anadón, R., Duarte, C.M. y Fariña, A.C. 2005. Impactos sobre los ecosistemas marinos y el sector pesquero.
- Cifuentes Lemus, J.L., Torres-García, P. y Frías, M. Marcela. 1997. La ciencia para todos ISBN 968-16-5247-9
- Bode, A., Álvarez-Ossorio, M.T., González, N., Lorenzo, J., Rodríguez, C., Varela, M. and Varela, M.M. 2005. Seasonal variability of plankton blooms in the Ria de Ferrol (NW Spain): II. Plankton abundance, composition and biomass. Estuarine, Coastal and Shelf Science 63, 285-300.
- Butrón A., Iriarte, A. and Madariaga, J. 2009. Size-fractionated phytoplankton biomass, primary production and respiration in the Nervión-Ibaizabal estuary: A comparison with other nearshore and estuarine ecosystems from the Bay of Biscay. Continental Shelf Research 29, 1088-1102.
- Cebrián, J. and Valiela, I. 1999. Seasonal patterns in phytoplankton biomass in coastal ecosystems. Journal of Plankton Research 21, 429-444.
- Cloern, J.E. 1996. Phytoplankton bloom in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. Reviews of Geophysics 34, 127-168.
- Cloern, J.E. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. Marine Ecology Progress Series 210, 223-253
- deCastro, M., Gomez-Gesteira, M., Alvarez, I. and Crespo, A.J.C. 2011. Atmospheric modes influence on Iberian Poleward Current variability. Continental Shelf Research 31, 425-432.

- Gameiro, C. and Brotas, V. 2010. Patterns of Phytoplankton Variability in the Tagus Estuary (Portugal). *Estuaries and Coasts* 33, 311-323.
- Garcia-Soto, C., Pingree, R.D. and Valdes, L. 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay: climate change and swoddy structure from remote sensing and in situ measurements. *Journal of Geophysical Research* 107, 3118.
- Gomez-Gesteira, M., deCastro, M., Alvarez, I. and Gomez-Gesteira, J.L. 2008. Coastal sea surface temperature warming trend along the continental part of the Atlantic Arc (1985–2005). *Journal of Geophysical Research* 113, C04010.
- Iriarte, A. and Purdie, D.A. 2004. Factors controlling the timing of major spring bloom events in a UK south coast estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 679-690.
- MAGRAMA 2009. Informe de España sobre la aplicación de la gestión integrada de las zonas costeras en España.
- Muylaert, K., Gonzales, R., Franck, M., Lionard, M., Van der Zee, C., Cattrijsse, A. Sabbe, K., Chou, L. and Vyverman, W. 2006. Spatial variation in phytoplankton dynamics in the Belgian coastal zone of the North Sea studied by microscopy, HPLC-CHEMTAX and underway fluorescence recordings. *Journal of Sea Research* 55, 253-265.
- Novoa, S., Chust, G., Sagarminaga, Y., Revilla, M., Franco, J., Valencia, V. and Borja, Á. 2012. Chlorophyll-a variability within Basque coastal waters and the Bay of Biscay, between 2005 and 2010, using MODIS imagery. *Revista de Investigación Marina, AZTI-Tecnalia* 19(5), 92-107
- Picado, A., Alvarez, I., Vaz, N. and Dias, J.M. 2013. Chlorophyll concentration along the northwestern coast of the Iberian Peninsula vs. atmosphere-ocean-land conditions. In: Conley, D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65, 2047-2052, ISSN 0749-0208.
- Platt, T., Hoepffner, N., Stuart, V. and Brown, C. (eds.) 2008. *Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology*. IOCCG. Reports of the International Ocean- Colour Coordinating Group. No. 7, IOCCG. Darmouth, Canada. 141 pp.
- Rojas Acuña, J., Paredes Peñafiel, R.I., Quezada García, M.G. y Carrillo Gomero, F. 2011. Variabilidad Espacial y Temporal de la Concentración de Clorofila-a en el mar peruano usando imágenes MODIS – AQUA. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. *Revista de Investigación de Física* 14, 111402404.

- Romacho Romero, M.J., Capel y Molina, J.J. 2001. La dinámica atmosférica en el flanco suroccidental de Europa. *Nimbus: Revista de climatología, meteorología y paisaje*, ISSN1139-7136, Nº 7-8, 5-20.
- Saha, S. and Coauthors, 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 91, 1015–1057. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
- Somoza, R.D., Kampel, M. and Buss Souza, R. 2007. Variabilidad de la concentración de clorofila-a en las aguas adyacentes a la plataforma cubana y su relación con las pesquerías de langosta (*Panulirus argus*). *Anais XIII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. INPE, 4699-4706.
- Taboada, I. 2007. Estudio del transporte de Ekman a lo largo de la costa gallega a partir de datos de viento obtenidos con el modelo MM5. Tesis de licenciatura de la Universidade de Vigo.
- Wooster, W.S., Bakun, A. and McClain, D.R. 1976. The seasonal upwelling cycle along the Eastern boundary of the north Atlantic. *Journal of Marine Research* 34, 131-141.

Environmental | Physics | Laboratory



EPhysLab