



MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Análisis comparativo y de la covariación del patrón espacio-temporal de temperatura y de concentración de clorofila sobre la plataforma y en océano abierto

Laura Ballesteros Redondo

Junio 2015

Tutor externo: Rafael González Quirós

Tutor académico: María del Carmen Recondo González

ÍNDICE

Resumen.....	6
Abstract	6
1. Introducción	7
2. Objetivos	11
3. Materiales y métodos.	12
3.1 Área de estudio	12
3.2 Datos de satélite utilizados	13
3.2.1. Datos de la temperatura superficial del mar (SST).....	14
3.2.2 Datos de la clorofila superficial del mar (SSChla).....	15
3.3 Análisis de los datos	16
3.3.1 Tratamiento de las imágenes	16
3.3.2 EOFs (Empirical Orthogonal Functions) o PCA (Principal Component Analysis).....	18
3.3.3 SVD (Singular Value Decomposition)	20
4. Resultados	21
4.1 Temperatura.....	21
4.2 Clorofila	26
4.3 Clorofila y temperatura	33
5. Discusión	35
6. Conclusión	37
7. Bibliografía	38

Resumen

Dos análisis “Empirical Orthogonal Function” (EOF) y un análisis “Singular Value Decomposition” (SVD) fueron llevados a cabo con el objetivo de caracterizar nuestra área de estudio en función de las variables clorofila superficial del mar (SSChl) y temperatura superficial del mar (SST) mediante el uso de datos de satélite obtenidas de los sensores MODIS-Aqua, Pathfinder y SeaWiFS. De estos análisis se deduce un patrón temporal de la SST que sigue un gradiente de oeste a este en la zona oceánica con un máximo de temperatura en verano y mínimo en invierno así como un patrón de clorofila con un máximo en primavera y otro más débil en otoño siendo este patrón más claro hacia la zona oceánica. En conclusión, han sido identificadas dos zonas, una zona oceánica en la cual la SST varía de oeste a este y está temporalmente correlacionado con la variación de la clorofila y una zona costera donde estos patrones no se correlacionan claramente debido a que tienen lugar otros muchos procesos de mesoescala.

Palabras clave: fitoplancton, termoclina, afloramiento.

Abstract

Two Empirical Orthogonal Function analysis (EOF) and a singular value decomposition (SVD) analysis were performed to characterized our study area in function of sea surface chlorophyll (SSChl) and sea surface temperature (SST) by means of MODIS-Aqua, Pathfinder and SeaWiFS satellite data. From the results of these analyses we have deduced a temporal pattern for SST from west to east in de oceanic zone and with a maximum in summer and a minimum in winter. Also, we have deduced a temporal pattern of chlorophyll with two peaks in spring and fall being this pattern clearer in the oceanic zone. In conclusion, we have identified an oceanic zone where SST varies from west to east and it is temporal correlated with chlorophyll variation and a coastal zone where chlorophyll and SST are not correlated due to there are more mesoscale processes taking place.

Keywords: phytoplankton, thermocline, upwelling.

1. Introducción

La estrecha relación espacial y temporal entre la temperatura del agua y la abundancia de fitoplancton, tanto en aguas continentales como marinas, está determinada por los procesos de estratificación y mezcla que afectan a la disponibilidad de nutrientes en la capa fótica, donde la intensidad lumínica es suficiente para permitir el crecimiento del fitoplancton. Globalmente, la temperatura del agua presenta un marcado patrón estacional cuyas características están condicionadas a su vez por la latitud. En zonas templadas, donde la estacionalidad climática es más marcada, las capas superficiales del océano presentan el mínimo de temperatura a finales del invierno o principios de la primavera. Esto conlleva una alta homogeneidad de la densidad desde la superficie hasta profundidades por debajo de la capa fótica, facilitando la renovación de los nutrientes inorgánicos necesarios para el crecimiento del fitoplancton (e.g. nitrato, fosfato y silicato) en superficie. A pesar de esta renovación, el crecimiento del fitoplancton está limitado por la baja intensidad y el corto periodo diario de luz y porque la excesiva mezcla vertical impide la estabilización de las células de fitoplancton cerca de la superficie, donde la intensidad lumínica es mayor. Con la llegada de la primavera y el incremento de la radiación solar las aguas superficiales comienzan a calentarse y estratificarse. Esta estabilización genera unas condiciones óptimas de intensidad de luz y concentraciones de nutrientes que facilitan un crecimiento exponencial de las poblaciones de fitoplancton en superficie. A medida que progresa la primavera, la estratificación térmica incrementa e impide la renovación de nutrientes que son consumidos por el fitoplancton. En verano, las capas superficiales están muy estratificadas, el fitoplancton ha consumido en ellas los nutrientes, y el máximo de abundancia de fitoplancton se encuentra a mayor profundidad, donde todavía quedan algunos nutrientes pero en la que el crecimiento está ya limitado por la baja intensidad lumínica. Con el comienzo del otoño la temperatura atmosférica desciende y la termoclina comienza a erosionarse progresivamente. En esa transición se suele producir una segunda proliferación de otoño, aunque de menor magnitud que la primaveral para posteriormente volver a decrecer y pasar a las condiciones invernales descritas al principio. (Field et al., 1998; Behrenfeld et al., 2006; Winder and Cloern, 2010; Navarro et al., 2012; Van de Poll et al., 2013) (Figura 1).

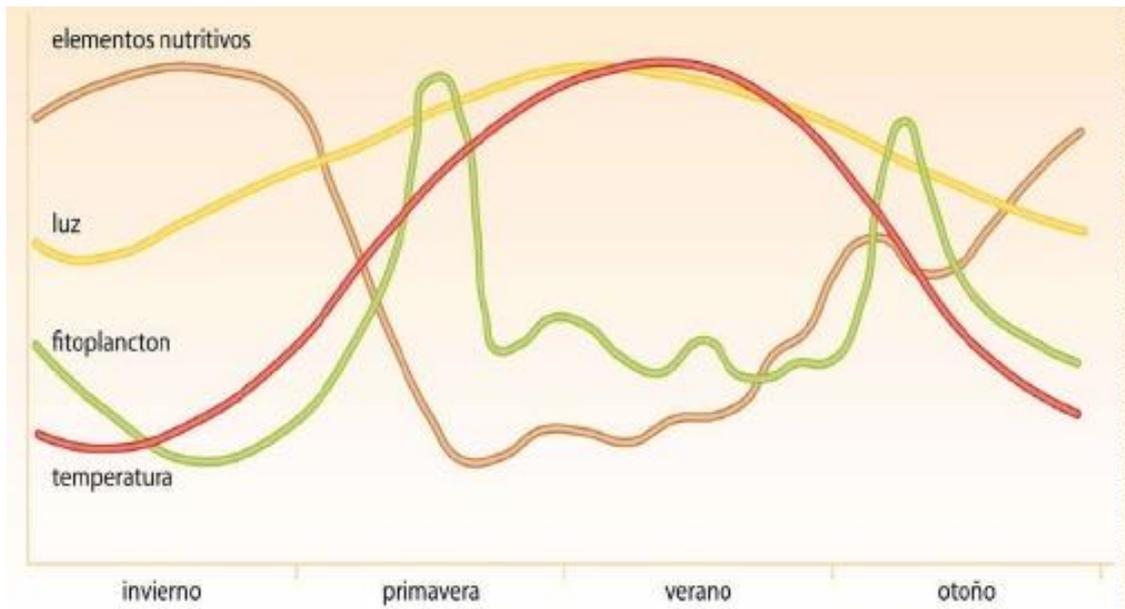


Figura 1. Variación anual de la temperatura, luz, nutrientes y fitoplancton (clorofila) típica de la zona templada.

No obstante, este patrón es modulado por otros procesos, en su mayoría de menor escala espacial y temporal, que son más frecuentes e intensos sobre la plataforma y que en general favorecen una mayor concentración de nutrientes en la capa fótica y por lo tanto incrementan la producción del fitoplancton. Los aportes fluviales son uno de estos procesos; suelen llevar altas concentraciones de nutrientes y provocar además una estratificación salina. Otro proceso importante es la interacción entre las ondas de marea y la menor profundidad de la plataforma, que genera una mayor turbulencia que resuspende nutrientes desde los sedimento o favorece en general la homogeneización de la columna de agua. Y quizás el más llamativo de todos estos procesos sea el afloramiento costero, que se produce cuando los vientos soplan paralelos a la costa y el transporte de Eckman que se genera en la columna de agua determina un desplazamiento neto de la masa de agua superficial hacia mar adentro que es sustituida por aguas profundas ricas en nutrientes. Por contra, aunque en zonas oceánicas también se observan procesos de mesoescala, estos son de menor intensidad. Aquí la termoclina es más intensa y dificulta la renovación de nutrientes en superficie (Huete-Ortega et al., 2014).

Además, para caracterizar la variación estacional en una zona es necesario contar con series temporales de varios años que integren la variabilidad que se produce entre distintos años, por ejemplo asociada a diferencias meteorológicas interanuales que por ejemplo pueden

provocar diferencias en la intensidad de los afloramientos costeros o en las descargas de los ríos. La variación temporal de la SST y clorofila es variable a lo largo de los años, por lo que es importante monitorizar su seguimiento en series temporales lo más largas posibles, con el fin de evitar otras variaciones naturales más allá de la variación estacional e interanual como las que pueden producir, por ejemplo, las fluctuaciones meteorológicas (evaporación, precipitación, etc.). La importancia de la SST radica en su influencia sobre la distribución de los organismos y puede ser medido mediante teledetección. La clorofila-a es un indicador de la biomasa del fitoplancton. La clorofila-a de la superficie del mar (SSChl) puede ser medida mediante teledetección por satélite en el rango espectral del visible. El fitoplancton contiene este pigmento fotosintético que lo hace ser de color verde. Esto se debe principalmente a que la clorofila a y b tienen dos picos de absorción en el rango del azul y del rojo y reflejan en el rango del verde (Figura 2). El fitoplancton, a su vez, tiene la característica de reproducirse rápidamente cuando las condiciones mejoran. Este crecimiento se puede observar en el aumento del número de células y del tamaño de éstas en el agua y es visible mediante observaciones de satélite.

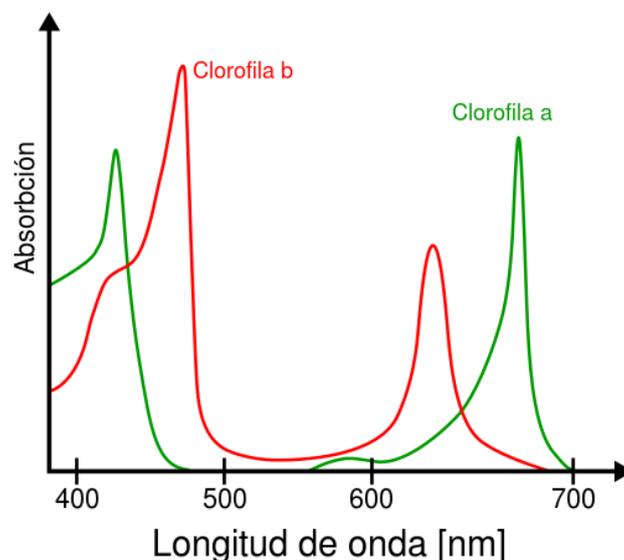


Figura 2. Espectro de absorción de la clorofila a y b presentes en las macroalgas y en el fitoplancton.

Las imágenes de satélite constituyen, por tanto, una valiosa herramienta para el seguimiento de la temperatura y clorofila, al disponer cada vez de mayores datos para el cálculo de estas variables mediante el uso de diferentes algoritmos. Los satélites que nos proporcionan la información necesaria sobre la SST y la clorofila son:

[MODIS](#) (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor abordo de los satélites Terra y Aqua y toma datos diurnos y nocturnos desde ambos satélites. En este estudio se usarán solo los datos del satélite Aqua. MODIS toma imágenes diarias y recoge 36 bandas espectrales (20 bandas ópticas y 16 térmicas) a una resolución espacial de entre 250 m (las bandas ópticas del rojo e infrarrojo cercano) y 1 km (las bandas térmicas). De los datos MODIS pueden obtenerse los productos de SST y de clorofila.

[SeaWiFS](#) (Sea-viewing Wide Field of view Sensor) es otro de los sensores utilizados en este trabajo. Iba a bordo del satélite Orbview-2 hasta diciembre de 2010 cuando se acabó la misión. Captaba ocho bandas espectrales (de 412 a 864 nm) a una resolución espacial de 4km para imágenes globales y 1 km para datos locales. Sus imágenes siguen siendo utilizadas para el estudio de la clorofila.

[Pathfinder](#) es un programa que ha usado diferentes sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de los satélites NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) para el cálculo de la SST y constituye el mayor conjunto de datos sobre la temperatura superficial del mar empezando en 1981. AVHRR proporciona datos en distintos intervalos dentro del rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo térmico del espectro electromagnético a una resolución espacial de 1100 m.

Estos satélites indicados describen orbitas a 700-800km de la superficie terrestre, tienen una periodicidad temporal aproximada de un día, cubren toda la superficie terrestre y sus imágenes están calibradas y validadas gracias al uso de bandas espectrales específicas para captar los datos necesarios, el uso de una determinada orientación y el uso de diferentes algoritmos para la corrección de la posición y el ruido. La ventaja de estos sensores es que tienen aplicación global con datos diarios desde un sensor simple y son adecuados para el estudio de zonas tropicales y templadas. Sin embargo, no pueden obtener datos de procesos tales como las mareas u otros procesos más regionales. Para el estudio de regiones concretas sería mejor otros con órbitas geoestacionarias que permitan tener imágenes cada hora de una zona concreta. Pero los satélites con órbitas polares también proporcionan una fuente de la que obtener datos cuando está nublado (media de la temperatura mensual). Esto quiere decir que, más allá del simple procesamiento píxel-por-píxel, podemos estudiar la información de los

píxeles adyacentes en el tiempo, lo que proporciona un mejor control de calidad de los datos (Ruddick et al., 2013). Sin embargo, para obtener series de datos para acometer estudios de la variación de estas variables a largo plazo es necesario combinar los datos de diferentes satélites y sus respectivos sensores. Para la clorofila existen algunos estudios como el de Brewin et al. (2014) que demuestran una correlación temporal entre los datos del SeaWiFs y MODIS (Aqua) y que las variaciones de los datos no son debidas a los diferentes algoritmos usados para las correcciones (corrección del ángulo de visión, ángulos cenitales, aerosoles, contaminación, etc.) y/o al cálculo de las variables. Por todo esto es necesario siempre observar la consistencia de los datos cuando hay diferencias de sensor como son el diseño, las bandas espectrales, las geometrías de observación e iluminación y su posible impacto en el proceso de corrección atmosférica. Para la temperatura ocurre lo mismo. Tanto las secuencias temporales de la temperatura superficial terrestre como la temperatura superficial del mar de los sensores MODIS y Pathfinder han sido estudiadas en varios trabajos para comprobar si son equivalentes y si se pueden juntar ambas series (Pedelty et al., 2007). Por lo tanto, asumiremos que las series temporales son adecuadas, ya que los mayores problemas se han visto en zonas costeras con gran influencia terrestre, que no es nuestro caso (García, 2013).

2. Objetivos

Para el presente estudio supondremos que existen diferencias entre la zona oceánica y la plataforma continental con respecto a las variables clorofila y SST y que, además, habrá un gradiente del oeste al este. El objetivo principal de este estudio es la evaluación de las diferencias y caracterización entre las zonas de plataforma continental y oceánica del cantábrico asturiano que incluye la zona de estudio del proyecto SCAPA, uno de cuyos objetivos es realizar un estudio comparativo de la dinámica del sistema planctónico en plataforma y en océano abierto.

Para ello establecemos unos objetivos más específicos que serán: el estudio de la variación espacio-temporal de la temperatura, el estudio de la variación espacio-temporal de la clorofila y la relación entre ambas variables.

3. Materiales y métodos:

3.1 Área de estudio

El área de estudio está limitada por las coordenadas geográficas 43.3° N y 44.6° N y 6.6°W y 5° W (Figura 3), que presenta una superficie semejante de superficie marina situada sobre la plataforma y de superficie más allá del talud y, además, incluye la zona de estudio del proyecto SCAPA.

Las diferencias entre estas zonas fueron observadas en el estudio de Santos et al. (2012) quienes encontraron temperaturas más frías en la costa que en mar abierto en el Mar Cantábrico. Vieron que el calentamiento de la columna de agua era mayor en la zona oceánica ya que ahí se producía la termoclina más intensa mientras que en la parte costera los diferentes procesos siguen mezclando el agua haciendo que el calentamiento sea menor. Pero, a su vez, Álvarez et al. (2012) observaron que la diferencia de temperatura entre la parte oceánica y costera era más pronunciada en la parte oeste del Mar cantábrico, produciéndose un gradiente hacia el este. Durante el verano, las condiciones de altas presiones atmosféricas que se dan en la región norte de las Azores favorecen los vientos del norte (García-Soto and Pingree, 2002) en el oeste de la Península Ibérica, y en menor medida los del nordeste en el Mar Cantábrico. Estos vientos generan corrientes superficiales que corren paralelas a la costa produciendo un transporte de Eckman de las aguas superficiales hacia mar abierto (Botas et al., 1989). Así, se produce un afloramiento de aguas frías y ricas en nutrientes que provienen de las profundidades en la plataforma continental que favorecen elevadas concentraciones de nutrientes en la zona. El afloramiento es más intenso en la costa oeste de la Península Ibérica y su intensidad decrece en el Mar Cantábrico hacia el Este. Además de las diferencias entre zona costera y mar abierto, Santos et al. (2012) observaron que, al utilizar grandes zonas de estudio, los puntos de costa constituían un porcentaje muy pequeño y eran irrelevantes en el estudio general, por lo que para el presente estudio de las diferencias entre litoral y mar abierto escogeremos una zona más pequeña en la que el peso de los datos oceánicos sea similar a la de los costeros.

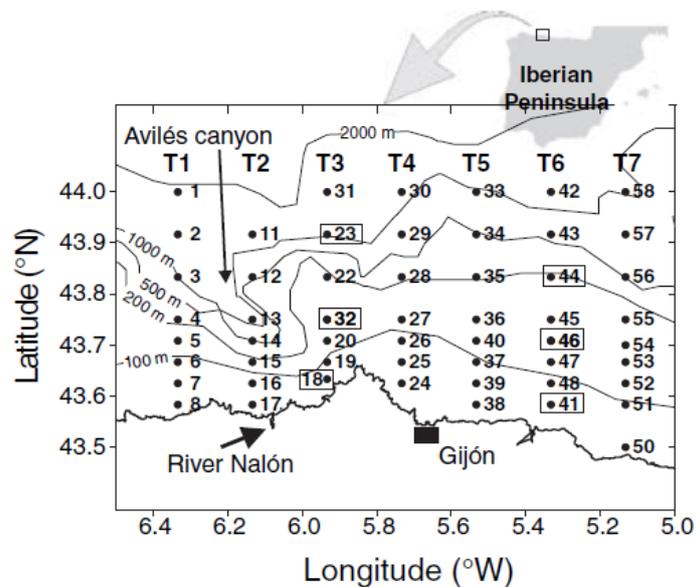


Figura 3. Área de estudio. Fuente: González-Quirós et al., (2004).

3.2 Datos de satélite utilizados

Todos los datos de satélite usados en este trabajo han sido obtenidos de la página oficial de NOAA (National Oceanic Atmospheric Administration) de los Estados Unidos de América. Todos los ficheros fueron descargados con formato de fichero binario NetCDF-3 con metadatos COARS/CF/ACDD. Se han utilizado imágenes de los satélites MODIS, SeaWiFs y Pathfinder. En la Figura 4 se muestra como ejemplo, una imagen de MODIS (Aqua) de la concentración media del mes de Enero de 2015 de clorofila (Figura 4). Los datos están descargados con un nivel de procesamiento 3. Esto quiere decir que vienen ya procesados para obtener los parámetros deseados con el menor ruido y error posible, y proporcionan datos de las variables ya agregados y proyectados en una malla de píxeles y sobre un periodo de tiempo bien definido. Los productos de Nivel 3 son adecuados para este tipo de estudios por su facilidad de uso y disponibilidad. Los datos que utilizamos son medias mensuales calculadas por el NOAA reduciendo así los puntos cubiertos por nubes. Utilizaremos las medias mensuales desde Enero de 1998 hasta Diciembre de 2014, un total de 204 meses. Tomamos años completos para que los meses tengan el mismo peso en el estudio.

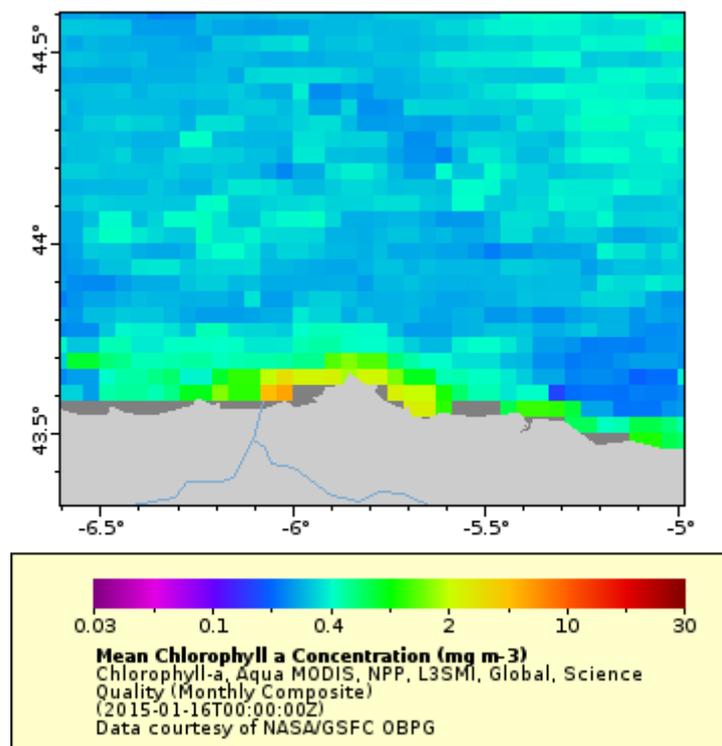


Figura 4. Ejemplo de una imagen de MODIS (Aqua) de la concentración media de clorofila a para el mes de Enero de 2015 en nuestra zona de interés.

Fuente:<http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/>

3.2.1. Datos de la temperatura superficial del mar (SST)

Los datos para la temperatura superficial del mar (SST) serán medias mensuales y estarán calculados en grados centígrados. Se han obtenido de los sensores:

- **Aqua MODIS.** Los datos de SST del sensor MODIS son calculados mediante el uso de un software desarrollado por el grupo "Ocean Biology Processing Group" (OBPG). La malla de datos tiene una resolución de 0.0417° y la serie temporal completa de este satélite va desde 2003/01/16 hasta el día de hoy. Para el cálculo de la SST desde el MODIS se utilizan algoritmos específicos. Los detalles del cálculo puede encontrarse en:

<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/sst/>

La SST se deriva de relación entre la radiancia recibida por el sensor y la temperatura de un cuerpo negro, asumiendo que el mar puede considerarse cuerpo negro. Para ello fue utilizado un algoritmo que usa las bandas 31 μm y 32 μm a 11 μm y 12 μm , respectivamente.

- **Pathfinder Ver 5.0** nos proporciona mallas de datos con una resolución de 0.0439° . La serie temporal completa de este programa de datos de satélite va desde 1981/09/16 hasta 2009/12/16. Para la temperatura calculada desde Pathfinder se han utilizado también algoritmos específicos en los que las bandas de $11\ \mu\text{m}$ y $12\ \mu\text{m}$ son utilizadas, que pueden consultarse en:

http://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/AVHRR_PATHFINDER_L3_SST_MONTHLY_DAYTIME_V5?ids=&values=&search=Pathfinder

Trabajaremos con la serie temporal Pathfinder de 1998/01/16 a 2002/12/16 y MODIS de 2003/01/16 a 2014/12/16. Todos los datos han sido homogeneizados a la misma posición y resolución (ver Sección 3.3.1).

3.2.2 Datos de la clorofila a superficial del mar (SSChI)

Los datos de clorofila a son medias mensuales y han sido calculados en mgm^{-3} . Estos datos han sido obtenidos de los sensores:

- **Aqua MODIS** nos proporciona mallas de datos con una resolución de 0.0417° . La serie temporal completa de este satélite va desde 2003/01/16 hasta el día de hoy. Estos datos han sido calculados mediante el uso de una relación empírica derivada de medidas in-situ y se ha implementado gracias a la disponibilidad de tres o más bandas entre 440-570nm del espectro electromagnético. El algoritmo utilizado es aplicable a todos los sensores actuales y puede verse en:

http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/chlor_a

- **Orbview-2 SeaWiFS** nos proporciona una malla de datos con una resolución de 0.083° . La serie temporal va desde 1997/09/16 hasta 2010/12/16. Para su cálculo se ha procedido de manera similar a la de MODIS.

Trabajaremos con la serie temporal SeaWiFs de 1998/01/16 a 2002/12/16 y MODIS de 2003/01/16 a 2014/12/16. Todos los datos han sido unidos y puestos a la misma resolución (ver Sección 3.3.1)

3.3 Análisis de los datos

3.3.1 Tratamiento de las imágenes

Una vez obtenidas todas las imágenes necesarias se han llevado a cabo diferentes tratamientos con el objetivo de conseguir las matrices multidimensionales necesarias para los análisis estadísticos que se realizaron posteriormente. Se requieren dos matrices bidimensionales de datos (una para SST y otra para SSChI) en las que cada columna corresponda a una localización (píxel) de la zona de estudio y cada fila al valor medio de la concentración de clorofila. Es necesario que en estas matrices haya datos en todos los casos de la matriz. Como ya se comentó anteriormente, los pares de satélites de los que se han obtenidos los datos para disponer de series completas de SST y SSChI durante el periodo de estudio no tienen la misma resolución, por lo que en primer lugar se procedió a homogeneizar la resolución de todas las imágenes adoptando la resolución más baja.

La falta de datos de SST o SSChI en determinados píxeles suele ser consecuencia de la presencia de nubes en la atmósfera, que impiden que el satélite reciba la radiación que emite o refleja la superficie marina para las longitudes de onda que registra.

Para solventar el problema de la resolución y de las nubes hemos usado un método de interpolación conocido como análisis objetivo mediante el uso de Matlab y que rellenará de datos esos píxeles cubiertos por nubes y recalculará los valores para los píxeles a la resolución de menor detalle. Este método debe aproximarse al valor real y minimizar el error en la medida que sea posible. El análisis objetivo consiste en una técnica de estimación lineal siguiendo el teorema de Gauss-Markov el cual permite un suavizado minimizando el error medio cuadrático de los datos estimados con respecto al valor real. Diversos estudios muestran que este es un método adecuado (Sassi et al., 2007; Gomis et al., 2000; Emery and Thomson, 2014).

La herramienta utilizada se denomina Interpolación Óptima mediante técnicas de análisis objetivo. Consiste básicamente en que partimos de N series de observaciones que pueden estar desigualmente repartidas y que hemos llamado ϕ_i , con $i=1$ a N . La hipótesis de partida consiste en que nuestras observaciones (píxeles) tienen una parte asociada a lo que podríamos llamar el valor real de la variable ϕ más un ruido debido a un error de medida, o simplemente una escala espacial irresoluble o que no interesa, ϵ (Ecuación 1). Este error lo consideramos ruido blanco, es decir, no está correlacionado ni entre sí ni con el valor de la variable. A su vez,

el valor de la variable φ consta de un valor medio o de fondo μ más una oscilación en torno a ese valor medio θ , la cual está asociada a distintos fenómenos físicos con una cierta coherencia espacial y, por tanto, es una variable que sí está correlacionada espacialmente.

$$\phi = \varphi + \varepsilon \quad (1)$$

$$\varphi = \mu + \vartheta \quad (2)$$

A partir de las medidas, lo que queremos es estimar la variable φ sobre una serie de puntos distribuidos sobre una malla regular (los píxeles). Lo hacemos mediante un estimador lineal, es decir, una combinación lineal de nuestras N medidas de φ . Para cada posición de la malla o pixel necesitamos los N pesos por los que debemos multiplicar las observaciones. La herramienta clave en toda teoría de interpolación óptima es la función de autocorrelación de la variable ϑ . Si dicha función es conocida, podemos calcular los pesos que nos proporcionan la interpolación óptima en el sentido de que el estimador de la variable φ tiene el menor error cuadrático medio de todos los estimadores lineales posibles. El problema se reduce al cálculo de la expresión indicada en la Ecuación 3:

$$\hat{\phi} = \mu + \frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{\alpha,i} - \bar{\theta}_{\alpha})(\theta_{\beta,i} - \bar{\theta}_{\beta}) / N}{\sqrt{\sigma_{\alpha}^2 \sigma_{\beta}^2}} \quad (3)$$

Siendo $\sqrt{\sigma_{\alpha}^2 \sigma_{\beta}^2}$ las variancias de los distintos píxeles y coeficientes de peso que hacen mínimo el error cuadrático medio $\overline{e(x)^2}$ entre el valor real y el esperado $\hat{\phi}$ de la variable interpolada. A su vez, el error cuadrático medio puede expresarse mediante la Ecuación 4:

$$\overline{e(x)^2} = \overline{[\phi - \hat{\phi}]^2} \quad (4)$$

La forma más directa de calcular la matriz de covarianzas $C(x,y)$ es suponerla como una función exponencial que depende de las coordenadas de los píxeles y la distancia $(|x, |y|)$ entre ellos (Ecuación 5):

$$C(x, y) = \exp\left[-\left(\frac{(x_i-x)^2}{l_x^2} + \frac{(y_i-y)^2}{l_y^2}\right)\right] \quad (5)$$

Así, le asignaremos a nuestra nueva malla de puntos un valor dependiendo del peso entre los datos más cercanos. Como nos basamos en una función exponencial para la asignación de los

pesos, cuando el gradiente entre los valores es pequeño el peso para estos será bajo pero si el gradiente entre los valores adyacentes es grande se le asignará un mayor peso a la hora de calcular el nuevo valor.

Con este método cambiamos la resolución de las imágenes. Para la temperatura, la resolución será la de Pathfinder (0.0439°) y para la clorofila la del sensor SeaWiFS (0.083°). Así, serán asignados ciertos valores a las nuevas mallas de pixeles siendo lo más parecidos posibles a los datos originales. Para el rellenado de los huecos debidos a las nubes se aplicó el mismo método. Se recalcularon los valores de cada pixel en función de los contiguos y sus pesos hasta que se encontró una función exponencial con la que los valores originales se parecían a los calculados y se eligió ese método como bueno.

Así, los datos quedaron unidos además en series temporales. Para la temperatura tendremos por tanto, una resolución de 0.0439° con datos de Pathfinder de Enero de 1998 a Diciembre de 2002 y MODIS de Enero de 2003 a Diciembre de 2014 (Pathfinder-MODIS-98-03-14). Para la clorofila tendremos una resolución menor, 0.083° , con datos de SeaWiFS de Enero de 1998 a Diciembre de 2002 y MODIS de Enero de 2003 a Diciembre de 2014 (SeaWiFS-MODIS-98-03-14).

3.3.2 EOFs (Empirical Orthogonal Functions) o PCA (Principal Component Analysis)

EOFs es un método para el análisis de una sola variable que permite encontrar patrones espaciales, estudiar la variación a lo largo del tiempo y da una medida de la importancia de cada patrón encontrado (Bjornsson and Venegas, 1997). Este análisis fue aplicado a las series temporales mensuales de la SST y la clorofila en R. R es un entorno de programación, análisis estadístico y software gráfico utilizado frecuentemente para la realización de este tipo de análisis (Kawamura, 1994; García, 2013; Mulugeta, 2014)

El EOF es un método estadístico que permite descomponer los datos multivariantes en sus componentes principales. La varianza de los datos puede ser descrita por unos pocos modos ortogonales que explican la mayor parte de la variación. Aplicado a este caso, los datos multivariantes serán tanto la serie temporal de SST como de la clorofila ambas con dos dimensiones espaciales (longitud y latitud) y una tercera dimensión, el tiempo. Para este análisis es necesario obtener una matriz de datos de dos dimensiones. Para ello, hemos creado

una matriz de datos $A \times B$ donde A es el tiempo ($A=204$ meses) y B son los píxeles de que formarán cada imagen. Una vez hecho esto, normalizamos los datos de clorofila calculando el logaritmo ya que no siguen una distribución normal al tratarse de datos biológicos que no tienen la misma frecuencia. Posteriormente, ha sido necesario hacer la estandarización de las variables mediante la extracción de la media en cada pixel y dividiendo entre la desviación estándar (Ecuación 6).

$$T'(x, t) = \frac{T(x, t) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T(x, t)}{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T(x, t) - \bar{T})^2}} \quad (6)$$

Las series temporales pueden ser representadas por una combinación lineal de los eigenfunction (F_n) (Ecuación 7).

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) F_n(x) \quad (7)$$

Donde x y t son el índice espacial y temporal respectivamente y a_n es la amplitud temporal o eigenvector o vectores propios. Los eigenfunctions (F_n) pueden ser visualizados como imágenes dando una representación espacial de la variación de cada modo o componente. Los valores de amplitud o eigenvalues o valores propios son estimados por la Ecuación (8).

$$Z_t(x) = Z'(x, t) \times \sum_{t=1}^n a_n(t) \quad (8)$$

Donde $Z_t(x)$ es el valor de la amplitud del pixel x , a_n es el eigenvector, $Z'(x,t)$ es el valor normalizado de la matriz de datos ($T(x,t)$) y N es el número de imágenes (meses). En función de estos valores escogemos un número determinado de componentes para la interpretación de los resultados y que consideramos "significativos". Este análisis combina las variables de manera que crear unas nuevas variables que tienen mayores desviaciones estándar. Así, desviaciones estándar más altas determinan las variables que explican más varianza. A su vez, podemos también observar la proporción de la varianza explicada, que determina cuanta información original es descrita por las nuevas variables. Todos estos factores permiten elegir los componentes más adecuados. Finalmente, utilizamos los ejes rotados de estos mismos componentes para demostrar la condición de ortogonalidad que implica este análisis.

Una vez hecho el análisis podemos definir o delimitar regiones en función de los valores de cada componente. Así, delimitaremos una región asignando un determinado valor para aquellos píxeles que contengan el valor más alto del eigenvalue en ese componente. Haremos esto con tantos componentes como hayamos elegido. La serie temporal de cada región fue calculada siendo el dato de cada mes la media de todos los píxeles en la región para dicho mes.

3.3.3 SVD (Singular Value Decomposition)

SVD es un método utilizado estudiar la relación entre dos variables potencialmente relacionadas. Este método identificará solo esos comportamientos o patrones de variación en los que ambas variables estén correlacionadas (Bjornsson and Venegas, 1997). Por lo tanto, utilizaremos este método para investigar la variabilidad espacial y temporal conjunta de la SST y la clorofila. Utilizaremos las matrices de datos estandarizados, y normalizada para SSChl, que ya habíamos utilizado en los análisis EOF. Tenemos dos matrices $A \times B$ y $A \times D$ siendo A el tiempo ($A=204$ meses) y B y D son los pixeles de que formarán cada imagen de SST y SSChl respectivamente. A partir de estas dos matrices se calcula la matriz de la covarianza C siguiendo la Ecuación 9.

$$C = T^t P \quad (9)$$

Una vez creada la matriz de covarianza, llevamos a cabo el “Singular Value Decomposition” de C. Tenemos que encontrar las matrices U, V y L (diagonal) (Ecuación 10).

$$C = ULV^t \quad (10)$$

Los “singular vector” de T serán las columnas de la matriz U y los “singular vector” de P serán las columnas de V. Estos valores serán visualizados como imágenes. Además, calculamos también los coeficientes de expansión que nos permiten ver como cada modo varía en el tiempo. Así, para la temperatura T y la clorofila P calculamos respectivamente Ecuación 11 y 12:

$$X = TU \quad (11)$$

$$Y = PV \quad (12)$$

Las columnas de las matrices X y Y contendrán los coeficientes de expansión de los diferentes modos o componentes.

La diagonal L contiene los “singular values”. Así, el total de la covarianza al cuadrado de C es dada por la suma de los cuadrados de los valores de la diagonal L. Gracias a este valor podemos evaluar la importancia relativa de cada uno de los componentes a través del “square covariance fraction” (SCF) explicado por cada componente (Ecuación 13)

$$SCF_i = \frac{l_i^2}{\sum l_i^2} \quad (13)$$

Así, los SCF quedan calculados para cada uno de los componente y en función de éste decidimos que componentes queremos mantener.

4. Resultados

4.1 Temperatura

El análisis EOF sobre los datos de temperatura genera 204 componentes principales que explican la misma variancia que los datos originales. El análisis determina el porcentaje de la variancia explicada por cada componente y el primero (EOF1) explica el 98.68% de la variancia total (Tabla 1).

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Desviación estándar	30.1635	2.19514	1.0514	0.82910	0.6797	0.59662
Proporción de la varianza	0.9868	0.00523	0.0012	0.00075	0.0005	0.00039
Proporción acumulada	0.9868	0.99203	0.9932	0.99398	0.9945	0.99486

Tabla 1. Desviación estándar y proporción de la varianza explicada y la correspondiente acumulada para los seis primeros componentes del análisis EOF realizado sobre la temperatura.

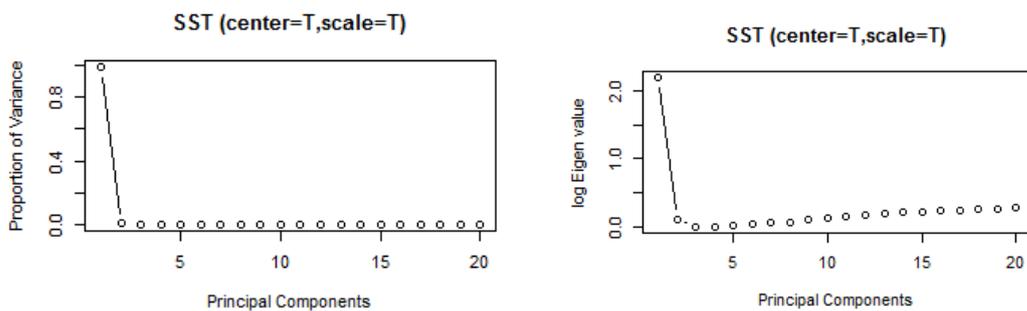


Figura 5. Proporción de la varianza y logaritmo de los Eigenvalues mediante los cuales determinamos los componentes utilizados.

Como hemos explicado anteriormente (ver Sección 3.3.2), a la vista de la Tabla 1 y Figura 5 elegimos los tres primeros componentes, que explican el 99.32% de la variación.

Los componentes representan la característica de la SST a lo largo de los meses. En la Figura 6 observamos los diferentes valores propios (eigenvalues) o cargas de cada pixel en los tres primeros componentes.

El primer componente (Figura 6 izquierda), que explica más del 98% de la varianza, presenta eigenvalues positivos en todos los píxeles y presenta los valores más altos en la zona oceánica este y los más bajos en la zona costera al oeste del Cabo Peñas. El segundo componente (Figura 6 centro) está claramente relacionado con la costa, donde presenta cargas positivas altas, y en valor absoluto mucho más elevadas que las cargas negativas que dominan en la zona oceánica. El tercer componente (Figura 6 derecha) está relacionado principalmente con la dinámica de la zona oceánica oeste, donde el primer componente no presentaba los valores más altos.

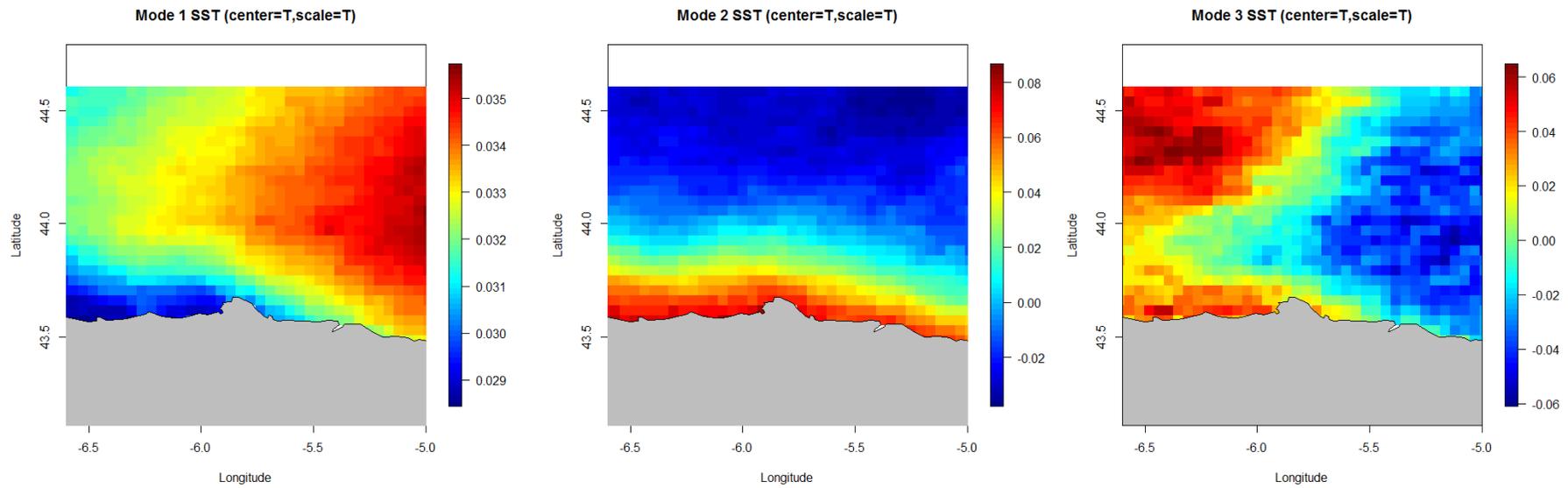


Figura 6. Valores propios (eigenvalues) para los tres primeros componentes (en orden de izquierda a derecha: primero, segundo y tercer componente) del análisis EOFs para la SST.

En la Figura 7 se representan los patrones temporales del componente, también llamados coeficientes de expansión.

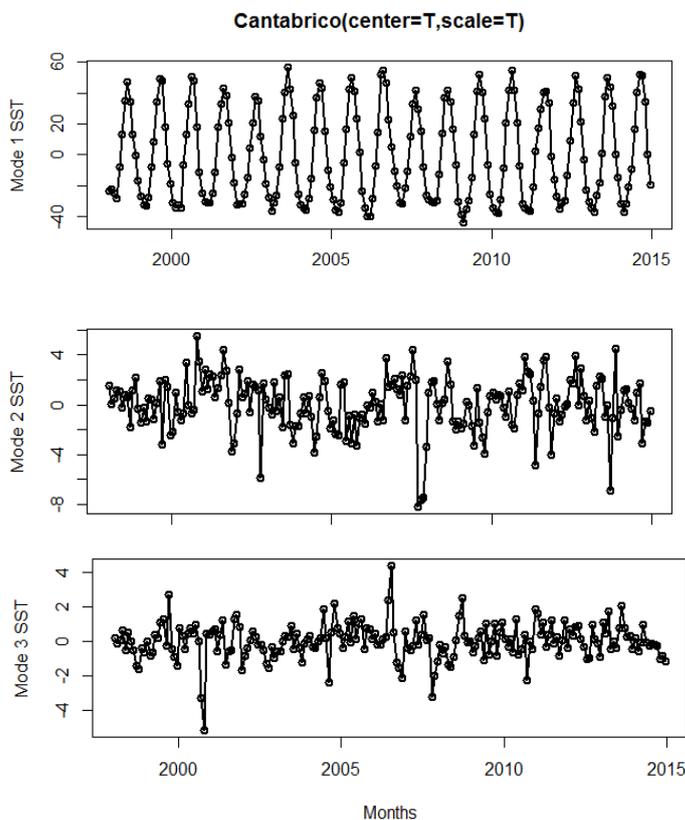


Figura 7. Series temporales de los tres primeros componentes (coeficientes de expansión).

En la serie temporal del primer componente (Figura 7) muestra un ciclo estacional muy marcado con valores bajos asociados a los meses de invierno y principio de la primavera y valores altos en verano. Diciembre, Enero, Febrero y Marzo tienen siempre cargas negativas mientras que los meses de Junio, Julio Agosto y Septiembre tienen siempre cargas positivas. Los otros dos componentes no tienen un patrón claro, presentan algunos valores que puntuales altos o bajos a lo largo de la serie temporal y, si acaso y sobre todo el componente 2, presentan oscilaciones con periodicidad de más de un año.

La regionalización resultante de la rotación de los ejes estableció dos regiones oceánicas, una al Este donde el componente 1 presentaba los eigenvalues más altos y otra en el Oeste, la zona más relacionada con el componente 3, y una zona costera que estaba relacionada con el componente 2 (Figura 8).

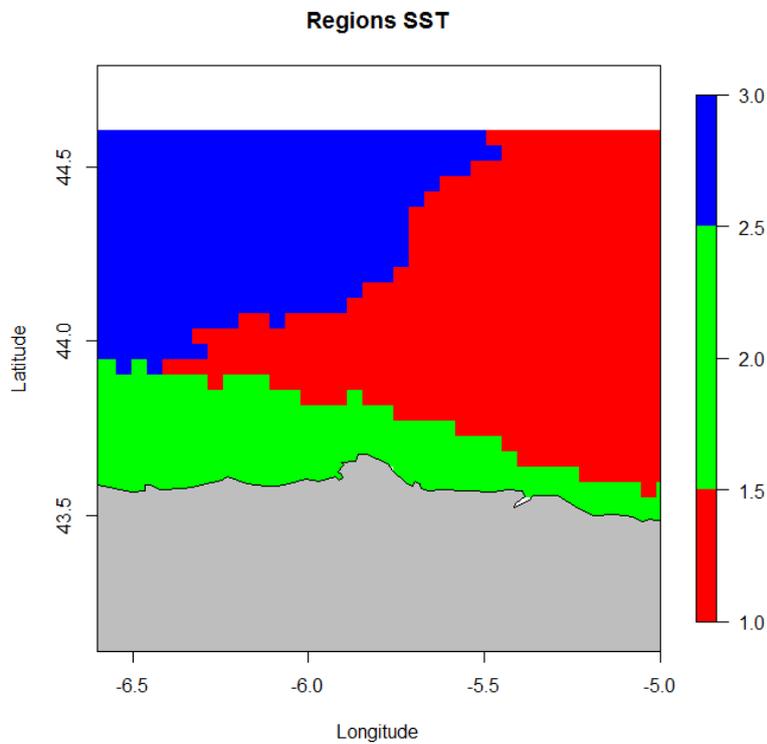


Figura 8. Valor medio mensual de la SST en cada una de las regiones establecidas por la rotación de los tres primeros EOFs.

Las tres regiones presentan un patrón de variación de la temperatura muy semejante y que se parece mucho al patrón temporal del componente 1. Esto no es sino el reflejo del elevado porcentaje de la varianza que explica este primer componente (Figura 9).

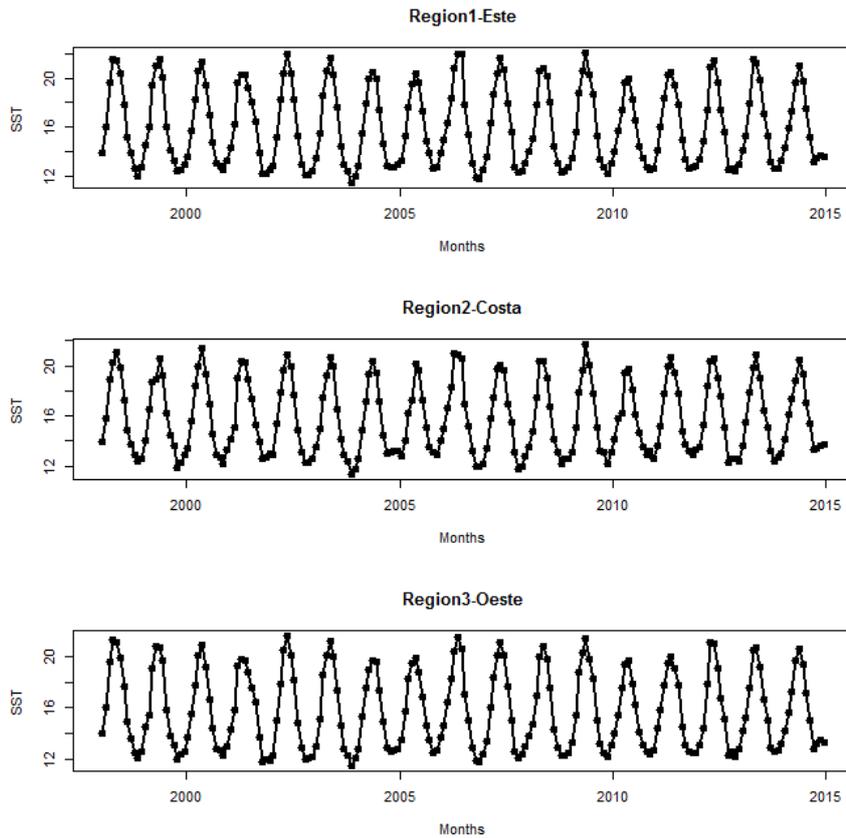


Figura 9. Series temporales de cada una de las regiones establecidas.

4.2 Clorofila

Análogamente al análisis de la SST realizamos el análisis de la clorofila. Podemos observar la proporción de la varianza explicada para los seis primeros componentes en la Tabla 2 y en la Figura 10.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Desviación estándar	12.693	4.33139	3.43148	2.74133	2.55667	2.35103
Proporción de la varianza	0.655	0.07626	0.04787	0.03055	0.02657	0.02247
Proporción acumulada	0.655	0.73124	0.77911	0.80966	0.83623	0.85870

Tabla 2. Desviación estándar y proporción de la varianza explicada y la correspondiente acumulada para los seis primeros componentes del análisis EOF realizado sobre la clorofila.

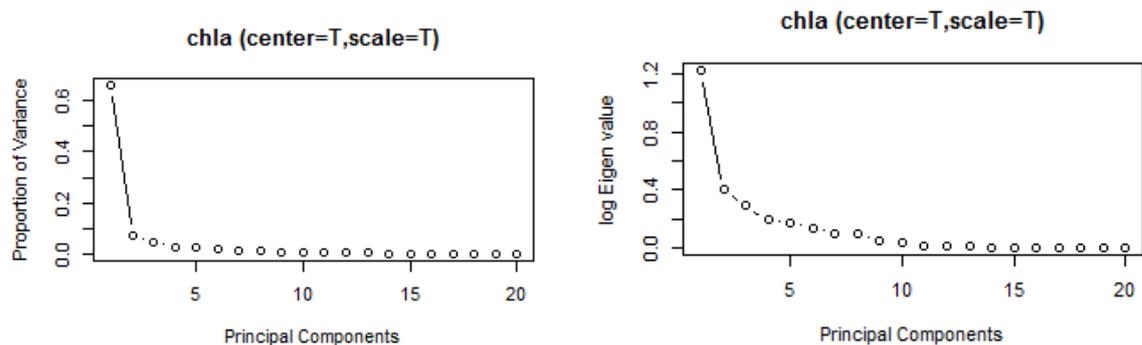


Figura 10. Proporción de la varianza y logaritmo de los Eigenvalues mediante los cuales determinamos los componentes utilizados.

El análisis determina el porcentaje de la varianza explicada por cada componente y el primero (EOF1) explica el 65.5% de la varianza total (Tabla 2).

Basándonos en estos datos decidimos quedarnos con los tres primeros componentes (77.91% de la varianza explicada). En este punto es importante mencionar que los criterios para escoger los componentes de interés cambian según la variable. La clorofila es una variable más cambiante de lo que puede ser la SST por lo que en los datos habrá más ruido. Así, un 77,91% de la varianza explicada se puede considerar un buen valor para la clorofila.

Los componentes representan la característica de la clorofila a lo largo de los meses. En la Figura 11 observamos los diferentes valores propios (eigenvalues) o cargas de cada pixel en los tres primeros componentes. Así, podemos ver que el primer componente (Figura 11 izquierda) del análisis tiene una correlación positiva con la parte oceánica, el segundo componente tiene correlación negativa con la costa y el tercer componente se correlaciona positivamente con la parte al oeste de la costa.

El primer componente (Figura 11 izquierda), que explica el 65.5% de la varianza, presenta los valores más altos en la zona oceánica y los más bajos en la zona costera. El segundo componente (Figura 11 centro) presenta también los valores más altos en la zona oceánica y los más bajos en la zona costera y, en valor absoluto, son mayores las cargas negativas que dominan en la zona al este del Cabo Peñas. El tercer componente (Figura 11 derecha) está relacionado principalmente con la dinámica de la zona costera oeste, donde el primer componente no presentaba los valores más altos.

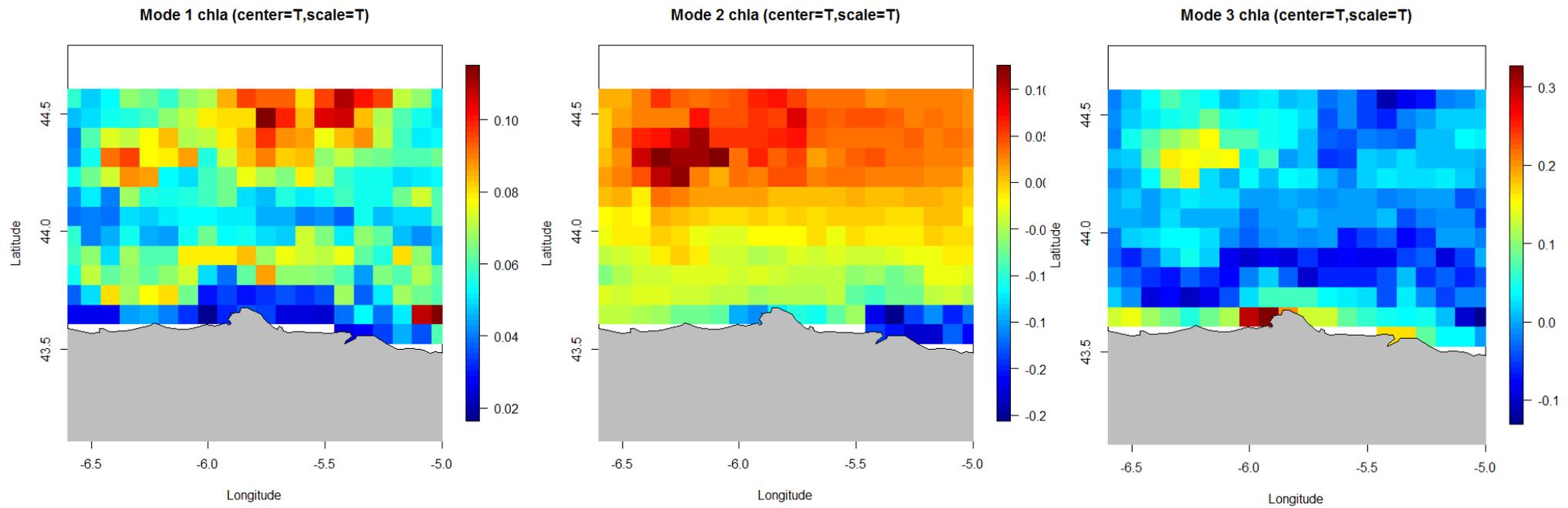


Figura 11. Valores propios (eigenvalues) para los tres primeros componentes (en orden: primero, segundo y tercer componente) del análisis EOFs para la clorofila.

La Figura 12 representa el patrón temporal del primer componente. Las series temporales de los otros dos componentes, como en el caso de la temperatura, no mostraron ningún patrón claro. En esta serie temporal podemos observar dos picos de clorofila, uno en los meses correspondientes al otoño y otro mayor correspondiente a los meses de primavera. También observamos el aumento de los máximos en los años 2009-2011.

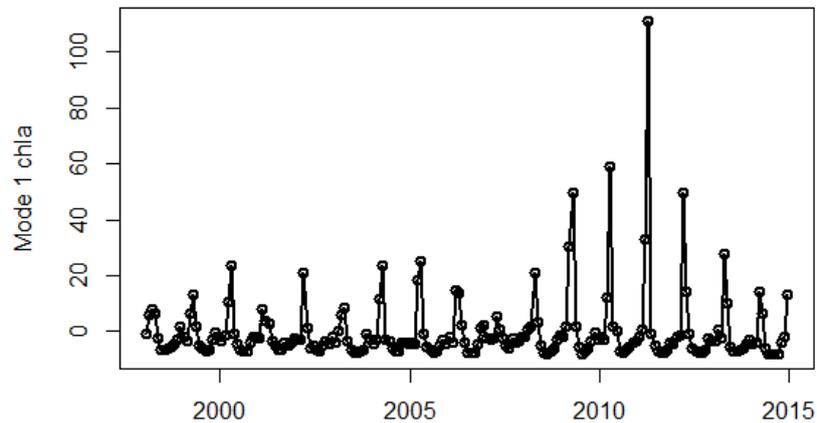


Figura 12. Serie temporal del primer componente del análisis EOF para la clorofila (coeficientes de expansión).

La regionalización resultante de la rotación de los ejes estableció tres regiones, una zona más oceánica donde el componente 1 presentaba los eigenvalues más altos, una zona intermedia relacionada con el componente 2 y una zona costera relacionada con el componente 3 (Figura 13)

Podemos observar un patrón estacional en la serie temporal de la región más oceánica con un pico de clorofila en primavera y otro menos pronunciado en otoño. También podemos observar cómo en la zona más costera este patrón no es tan evidente.

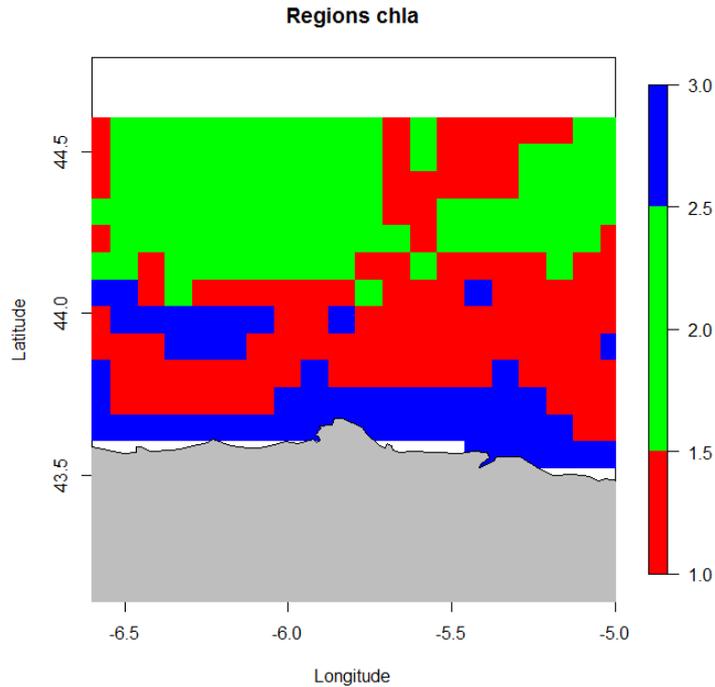


Figura 13. Valor medio mensual de la clorofila en cada una de las regiones establecidas por la rotación de los tres primeros EOFs.

La región más oceánica presenta un patrón de variación de la clorofila semejante al patrón temporal del componente 1. Este patrón se distorsiona más cuanto más se aproxima a la costa (Figura 14). Podemos observar un patrón estacional en la serie temporal de la región más oceánica con un máximo de clorofila en primavera. En algunos años se percibe un segundo máximo en otoños pero de mucha menos magnitud y en la mayoría no se observa. La zona intermedia, situada en el entorno del talud continental, presenta un patrón semejante al de la zona oceánica, aunque en este caso solo existe un máximo que difiere claramente del resto de la serie en el año 2009. En la zona costera también existe un claro patrón estacional, pero este no consiste en un máximo tan marcado en primavera, y no se alcanzan en ningún caso los valores observados durante el periodo 2009-2012 en la región oceánica ni en 2009 en la intermedia.

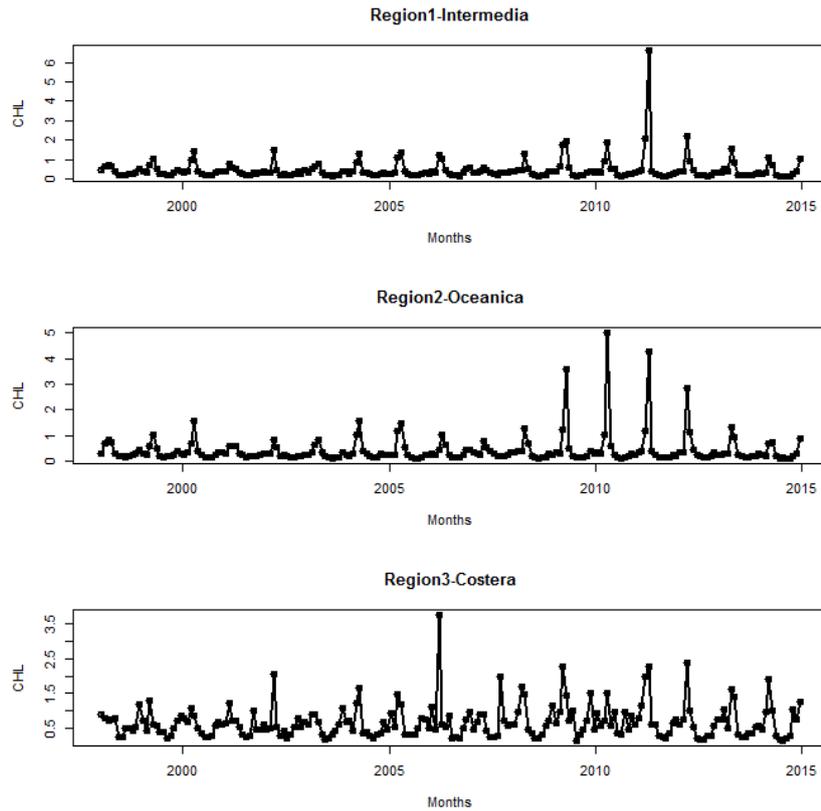


Figura 14. Series temporales de cada una de las regiones establecidas para la clorofila.

Así quedan delimitadas tres zonas desde el interior a la parte más oceánica. Pero, a la vista de estos datos podemos observar que hay datos anómalos (Figura 12) (ver en la Sección 5). Por lo que realizamos el análisis otra vez sobre la serie temporal 98-08 para eliminarlos años anómalos y ver si éstos influenciaban nuestros datos.

Para la serie temporales sin años anómalos (1998-2008) tomamos de nuevo los tres primeros componentes (74.69% de la varianza explicada). Los resultados de EOF no variaron mucho pero a la hora de regionalizar (Figura 15) y de analizar las series temporales (Figura 16) sí que se pudo observar una mejor representación de los patrones.

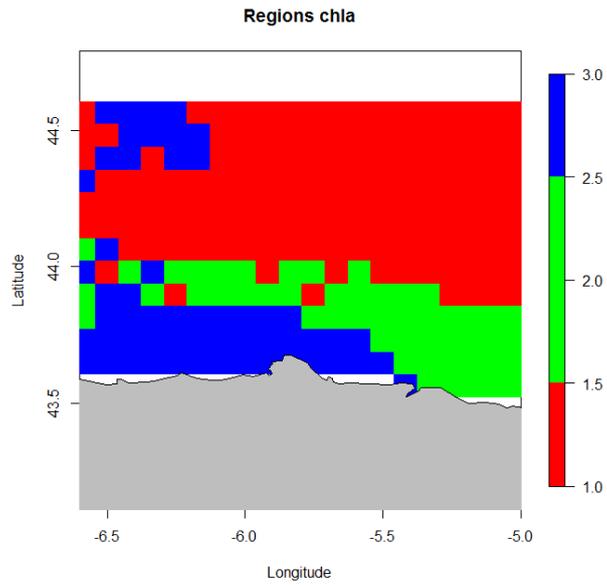


Figura 15. Valor medio mensual de la clorofila en cada una de las regiones establecidas por la rotación de los tres primeros EOFs.

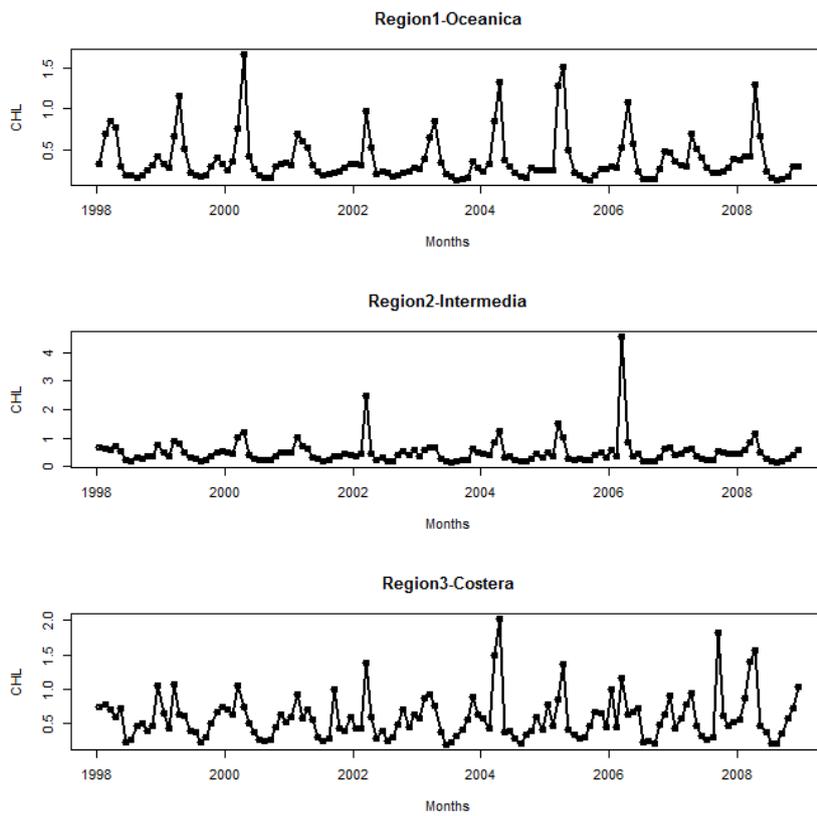


Figura 16. Series temporales para las diferentes regiones establecidas.

Las regiones quedan un poco mejor limitadas y se observa mejor los patrones. Seguimos observando que en la zona oceánica los picos de clorofila se dan en algunos de los meses de otoño y siempre en primavera y en la costa este patrón está distorsionado ya que hay otros picos de clorofila.

4.3 Clorofila y temperatura

Los tres primeros modos resultantes del análisis SVD de la variación conjunta de clorofila y SST explican más del 99% de la variación (SCF) siendo el primer modo el más importante (Figura 17). Los patrones espaciales del primer modo de la clorofila muestran un máximo en la parte oceánica (Figura 18) y los de la SST en la parte oceánica con un gradiente decreciente de este a oeste (Figura 19). En la serie temporal (Figura 20) observamos que los máximos de clorofila son en primavera y un segundo pico en otoño. Los patrones de temperatura muestran su máximo en verano y mínimos en invierno. Los máximos del componente de la clorofila coinciden con la época de incremento de la temperatura.

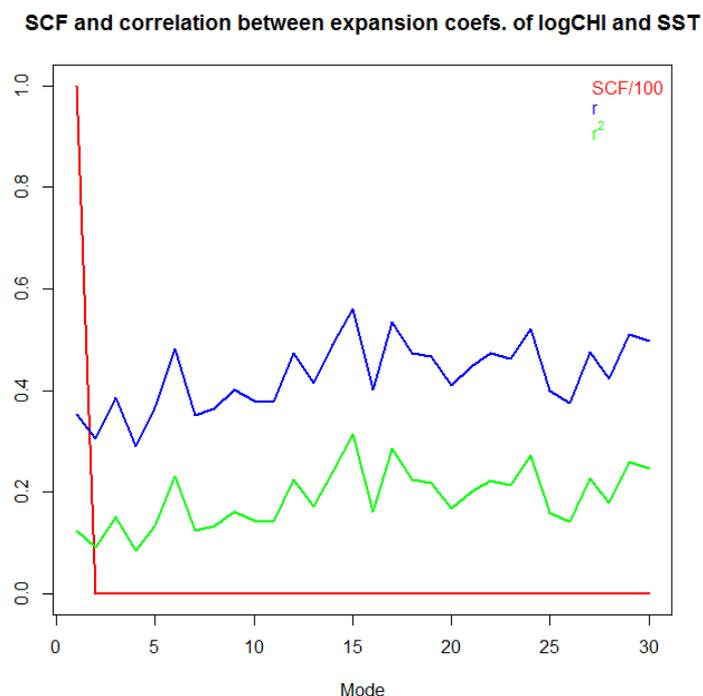


Figura 17. SCF resultante del análisis SVD clorofila-temperatura.

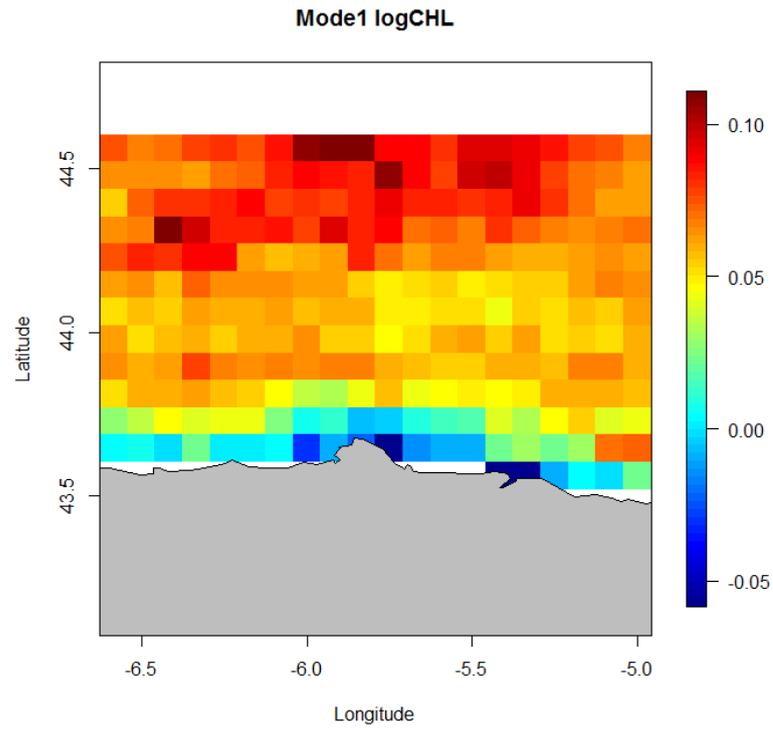


Figura 18. Primer componente del SVD para la clorofila

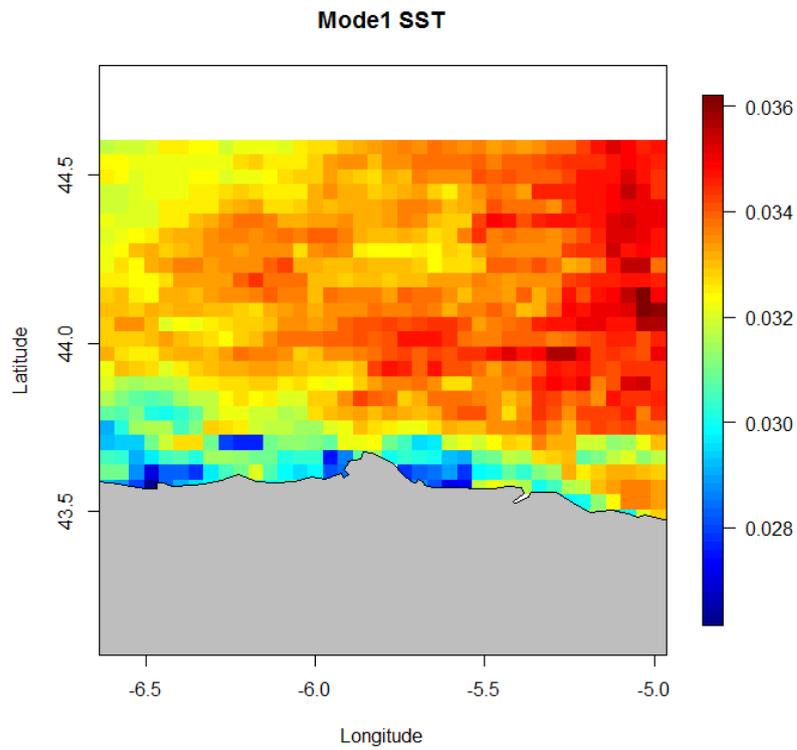


Figura 19. Primer componente del SVD para la SST

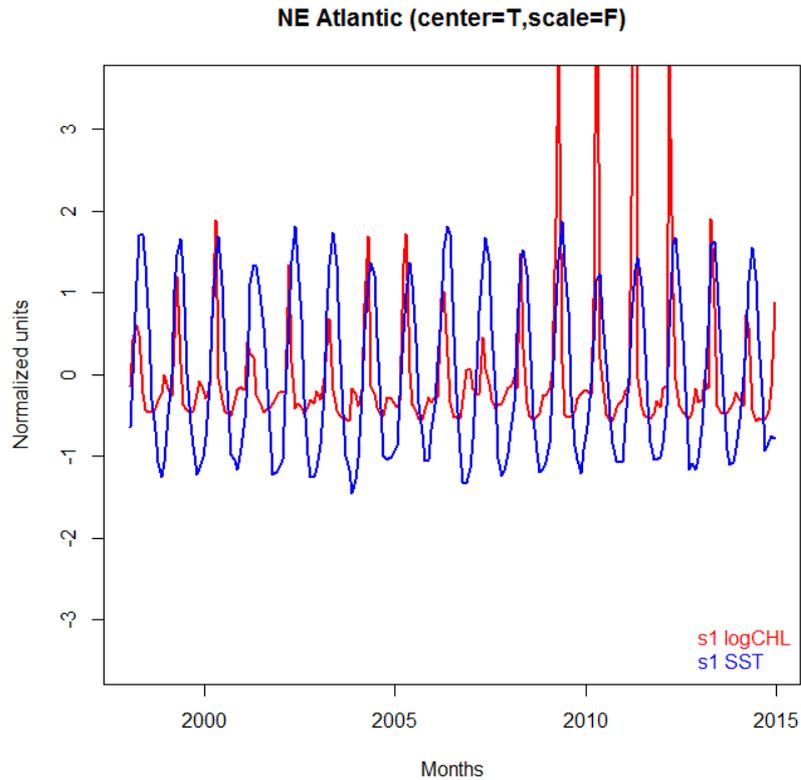


Figura 20. Series temporales de la clorofila y la SST.

5. Discusión

A la vista de los resultados, los valores positivos y negativos para la temperatura en las series temporales indican que hay un pico de altas temperaturas en verano y otro de bajas temperaturas en invierno en el área estudiada (Figura 7). Este patrón temporal también se vio en todas la regiones que establecimos (Figura 9). La variación espacial de la temperatura sigue un gradiente de oeste a este en la parte oceánica (Figuras 6 y 8). Este gradiente de temperaturas se debe en la costa a una mayor influencia hacia el oeste del afloramiento costero (Botas et al.,1989), que se produce como consecuencia de los vientos paralelos a la costa que en verano y asociados al anticiclón de las Azores. Sin embargo, el gradiente Oeste-Este en la zona oceánica se debe a un incremento de la estratificación térmica en la zona interna del Golfo de Vizcaya como consecuencia del efecto de estancamiento asociado a la forma del propio Golfo.

Los resultados para la clorofila muestran un patrón temporal claro en la zona oceánica donde se produce un pico más pronunciado en primavera debido al aumento de las horas de luz y al incremento de la estratificación térmica (Álvarez et al., 2012) y un pico más leve en otoño (Figura 11). También observamos que en los años 2009-2011 los picos de clorofila aumentaban mucho (ver Figura 11). El problema de estas imágenes es que son medias mensuales. Estas medias están hechas haciendo la media de todos los días en los que el satélite pasa por la zona en concreto. El problema viene cuando en todos esos días hay nubes y solo se consiguen unos pocos días con datos al mes lo que hace de esa media una medida poco representativa. Por ejemplo, se ve que en 2014 el pico de primavera se asemeja a otros años como el 2006 pero en los datos in-situ vemos que este incremento fue bastante mayor. Cuando analizamos detenidamente las imágenes de clorofila disponibles para marzo de 2014 vemos que solo tenemos 9 imágenes con datos. Esto puede significar que la media está subestimada al haber pocos días con datos que no tienen por qué haber coincidido con el máximo de fitoplancton observado in-situ. Esto mismo puede haber pasado con el máximo que se observa en 2011 y otros años anómalos haciendo que se distorsionen los resultados del análisis. Cuando miramos los datos diarios de clorofila y 3days-composite en la página de [onceancolor](#) observamos que la media se basa en datos de muy pocos días en abril para esos años. Esto quiere decir que debemos tener cuidado a la hora de interpretar los datos. Teniendo esto en cuenta realizamos el análisis para la serie temporal 98-08 y pudimos observar que la variación espacial y temporal era similar que en el caso anterior y que se establecían las mismas zonas que en el análisis previo. Así, se concluye que existe un patrón anual con máximos en primavera y otoño en la zona más oceánica y que este patrón se distorsionaba según íbamos acercándonos a la costa debido, probablemente, a procesos costeros (González-Quirós et al., 2004).

Cuando analizamos la covarianza de la clorofila y la temperatura en nuestra área de estudio se observa una relación temporal clara entre ambas variables en la zona oceánica. La relación entre las series temporales de los componentes de la SST y la SSChI obtenidos mediante el SVD es una demostración por un método objetivo de la fuerte relación que existe entre la dinámica de ambas variables. En primavera, además del incremento de la intensidad lumínica, el incremento de la temperatura estabiliza las células de fitoplancton en la capa superficial donde los nutrientes renovados durante el invierno permiten al fitoplancton alcanzar tasas de crecimiento muy elevadas que dan lugar a máximos de SSChI muy marcados. Como consecuencia de que esa estratificación térmica se incrementa y no hay ningún proceso hidrográfico que la rompa en la zona oceánica, los nutrientes se agotan rápidamente en superficie y el fitoplancton reduce rápidamente su concentración en las capas superficiales

observadas por los satélites. En otoño, con el descenso de la temperatura la termoclina se rompe y los nutrientes entran de nuevo en circulación en las capas superficiales momento en el que se puede producir un segundo máximo de fitoplancton pero de menor magnitud (Álvarez et al., 2012). En invierno, la columna de agua es homogénea. Las capas más profundas del océano contienen mayores concentraciones de nutrientes, y por tanto la mezcla de agua que se produce durante el invierno hace que esas concentraciones de nutrientes seas altas también en la superficie. Pero, en invierno, debido a la baja intensidad de luz y a la homogeneidad de la columna de agua, que no permite al fitoplancton estabilizarse cerca de la superficie, el crecimiento del fitoplancton está limitado. Los patrones explicados hasta ahora coinciden con los resultados encontrados en la parte oceánica de la zona de estudio. Sin embargo, en la zona costera y de plataforma existen otros mecanismos de aporte de nutrientes a las capas superficiales que pueden explicar que estos patrones no sean tan marcados o presenten ciertas diferencias con la zona oceánica. Entre estos mecanismos de aporte de nutrientes están el afloramiento (Botas et al., 1989), los aportes de ríos (Prego y Vergara, 1998), el efecto de las mareas y la topografía de la zona (González-Quirós et al., 2004).

6. Conclusión

Los resultados de este trabajo indican que el área de estudio está caracterizada por un patrón temporal de clorofila con dos máximos, primavera y otoño, en la zona oceánica y que está, a su vez, correlacionado con la variación espacial de la temperatura con un gradiente de oeste a este. Contiene, además, una zona costera en la que el patrón de clorofila no puede sólo correlacionarse con la temperatura, ya que es en esta zona donde tienen lugar otros muchos procesos de mesoescala que pueden influenciar la producción primaria en la plataforma continental como pueden ser el afloramiento costero, las corrientes debidas a diferentes densidades del agua, oleaje y la interacción con la topografía de la zona.

7. Bibliografía

Álvarez, I., Lorenzo, M. N. and deCastro, M. (2012). Analysis of chlorophyll a concentration along the Galician coast: seasonal variability and trends. *Marine Science*.

Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. a, McClain, C. R., Sarmiento, J. L., Feldman, G. et al. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444 (7120), 752–5.

Bjornsson, H. and Venegas, S.A., (1997). A Manual for EOF and SVD Analyses of Climatic Data. CGCR Report No.97-1 . Center for Climate and Global Change, McGill University.

Botas, J. A., Fernandez, E., Bode, A., & Anadon, R. (1989). Cantabrian Upwelling off the Central Coast (Bay of Biscay). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 185–199.

Brewin, R. J. W., Mélin, F., Sathyendranath, S., Steinmetz, F., Chuprin, A., & Grant, M. (2014). On the temporal consistency of chlorophyll products derived from three ocean-colour sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 97(August 1997), 171–184.

Emery, W. and Thomson, R. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 3ª Edición. Polonia: Elsevier; 2014.

García Redondo, Jesús. (2013) Comparación de la concentración de clorofila superficial del mar medida por los satélites SeaWiFS y MODIS en la región atlántica sureuropea. Trabajo Fin de Máster. Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Oviedo. Directores: Rafael González Quirós y Carmen Recondo González.

García-Soto, C. and Pingree (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*, VOL. 107, 1–29.

Gomis, D., Ruiz, S., and Pedder, M. A. (2000). Diagnostic analysis of the 3D ageostrophic circulation from a multivariate spatial interpolation of CTD and ADCP data. *Deep-Sea Research* I 48, 269–295.

González-Quirós, R., Pascual, A., Gomis, D. and Anadón, R. Influence of mesoscale physical forcing on trophic pathways and fish larvae retention in the central Cantabrian Sea. *Fisheries Oceanography* 13:6, 351–364

Huete-Ortega, M., Rodríguez-Ramos, T., López-Sandoval, D., Cermeño, P., Blanco, J., Palomino, R., Marañón, E. (2014). Distinct patterns in the size-scaling of abundance and metabolism in coastal and open-ocean phytoplankton communities. *Marine Ecology Progress Series*, 515, 61–71.

Field, C. B. (1998). Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components. *Science*, 281(5374), 237–240.

Kawamura, R. (1994). A rotated EOF Analysis of Global Sea Surface Temperature Variability with interannual and Interdecadal Scales. *Atmospheric and Hydrospheric Science*.

Koutsikopoulos, C., Beillois, P., Leroy, C., & Taillefer, F. (1998). Temporal trends and spatial structures of the sea surface temperature in the Bay of Biscay. *OCEANOLOGICA ACTA - VOL. 21 - No2*.

Mulugeta Debalkie, Henok (2014) Análisis de patrones espacio-temporales de variables oceanográficas obtenidas por Teledetección. Trabajo Fin de Máster. Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Oviedo. Directores: Rafael González Quirós y Carmen Recondo González.

Navarro, G., Vázquez, Á., Macías, D., Bruno, M., & Ruiz, J. (2012). Understanding the patterns of biological response to physical forcing in the Alborán Sea (western Mediterranean). *Geophysical Research Letters*, 38(23).

Pedely, Jeffrey; Devadiga, Sadashiva; Masuoka, Edward; et ál. (2007). Generating a Long-term Land Data Record from the AVHRR and MODIS instruments. 2007 IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, VOLS 1-12: SENSING AND UNDERSTANDING OUR PLANET Colección: IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS) Páginas: 1021-1024

Prego, R., Boi, P., & Cobelo-garcía, A. (2008). The contribution of total suspended solids to the Bay of Biscay by Cantabrian Rivers (northern coast of the Iberian Peninsula), 72, 342–349

Ruddick, K., Neukermans, G., Vanhellefont, Q., & Jolivet, D. (2013). Challenges and opportunities for geostationary ocean colour remote sensing of regional seas: A review of recent results. *Remote Sensing of Environment*, 146, 63–76.

Santos, F., Gómez-Gesteira, M., Decastro, M., & Alvarez, I. (2012). Variability of coastal and ocean water temperature in the upper 700 m along the Western Iberian Peninsula from 1975 to 2006. *PloS one*, 7(12), e50666.

Van de Poll, W. H., Kulk, G., Timmermans, K. R., Brussaard, C. P. D., van der Woerd, H. J., Kehoe, M. J., ... Buma, a. G. J. (2013). Phytoplankton chlorophyll a biomass, composition, and productivity along a temperature and stratification gradient in the northeast Atlantic Ocean. *Biogeosciences*, 10(6), 4227–4240.

Winder, M., and Cloern, J. E. (2010). The annual cycles of phytoplankton biomass. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 365(1555), 3215–26.

