

Egoitza Nagusia / Sede Central

Txatxarramendi Ugartea z/g

E-48395 Sukarrieta - Bizkaia (Spain)

Tel.: +34 94 657 40 00 - Fax: +34 94 657 25 55

Parque Tecnológico de Bizkaia

Astondo bidea - Edificio 609

E-48160 Derio - Bizkaia (Spain)

Tel.: +34 94 657 40 00 - Fax: +34 94 657 25 55

Herrera Kaia - Portu aldea z/g

E-20110 Pasai - Gipuzkoa (Spain)

Tel.: +34 94 657 40 00 - Fax: +34 94 657 25 55

www.azti.es

info@azti.es



Estudio de la clorofila, elemento clave para la Estrategia Marina Europea y la Directiva Marco del Agua

para:

Agencia Vasca del Agua - Uraren Euskal Agentzia



Pasaia, 17 de diciembre de 2012

Tipo documento	Informe
Título documento	Estudio de la clorofila, elemento clave para la Estrategia Marina Europea y la Directiva Marco del Agua
Fecha	18/12/2012
Proyecto	La clorofila, elemento clave para la Estrategia Marina Europea y la Directiva Marco del Agua: relación con los factores océano-meteorológicos en la plataforma costera vasca y empleo de la teledetección para la estimación de las concentraciones de clorofila.
Código	IM11CLAVE
Cliente	Agencia Vasca del Agua - Uraren Euskal Agentzia

Equipo de proyecto

Marta Isabel Revilla Rodríguez
Ángel Borja Yerro
Guillem Chust Peters
Almudena Fontán Gómez
Javier Franco San Sebastián
Manuel González Pérez
Stéfani Novoa
Yolanda Sagarminaga Zabala
Victoriano Valencia Santana

Responsable proyecto Dra. Marta Isabel Revilla Rodríguez

Revisado por Dr. Javier Franco San Sebastián
Fecha 09/12/2012

Si procede, este documento deberá ser citado del siguiente modo:

Revilla M., Borja Á., Chust, G., Fontán, A., Franco, J., González, M., Novoa, S., Sagarminaga, Y., Valencia, V. 2012. Estudio de la clorofila, elemento clave para la Estrategia Marina Europea y la Directiva Marco del Agua. Informe elaborado por AZTI-Tecnalia para la Agencia Vasca del Agua. 102 pp.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS.....	5
2. INTRODUCCIÓN	6
3. MATERIAL Y MÉTODOS	10
3.1 Análisis de series temporales largas (≥ 10 años).....	10
3.1.1 Recopilación de datos	10
3.1.2 Ciclo estacional	12
3.1.3 Tendencias temporales: Revisión bibliográfica	13
3.2 Empleo de la teledetección en la evaluación de la calidad del agua	14
3.2.1 Datos in situ.....	14
3.2.2 Imágenes MODIS	15
3.2.3 Algoritmos de clorofila-a.....	15
3.2.4 Cálculo del percentil 90 y clasificación del estado	17
3.2.5 Estudio de la influencia de las descargas de ríos	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
4.1 Series temporales largas.....	19
4.1.1 Ciclo estacional en el entorno de la estación D2 (offshore)	19
Insolación, temperatura atmosférica y SST.....	19
Precipitación y evaporación.....	22
Caudal fluvial	23
Salinidad	24
Estabilidad vertical de la columna de agua	25
Condiciones ópticas	25
Clorofila (SeaWiFS e in situ).....	27
4.1.2 Tendencias temporales en el entorno de la estación D2 (offshore)	29
Contexto océano-climático a gran escala.....	29
Influencia climática sobre el fitoplancton	31
4.1.3 Diferencias a lo largo de un radial costa-océano	39
Temperatura, salinidad y clorofila.....	39
Riesgo de eutrofización	44
4.2 Evaluación de la calidad del agua mediante teledetección.....	47
4.2.1 Espectrometría versus fluorescencia con CTD	47
4.2.2 Datos de satélite versus medidas in situ	48
4.2.3 Ciclo anual de la clorofila mediante teledetección.....	49
4.2.4 Clasificación del estado del fitoplancton.....	50
4.2.5 Estudio de la influencia de las descargas de ríos en la calidad de las aguas costeras colindantes.....	53
Variabilidad diaria	53
Variabilidad estacional.....	55
Área de influencia de las plumas fluviales en costa	58
Tendencias interanuales	59
5. CONCLUSIONES	60
ANEXO A – RECOPILACIÓN DE SERIES DE DATOS	63
Concentración de clorofila	63
Temperatura y salinidad en el radial D	70
Estabilidad de la columna de agua en el radial D.....	73

Nutrientes y condiciones ópticas en el radial D	73
Datos meteorológicos del observatorio de Igeldo.....	78
Datos de temperatura superficial del mar.....	79
Caudales fluviales	80
ANEXO B – TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SERIES Y CASOS TEST.....	81
Técnicas de análisis de series.....	81
Casos test.....	83
ANEXO C – CONDICIONES DE REFERENCIA DE LA CLOROFILA	93
Estaciones de referencia en el Cantábrico Oriental	94
Clasificación de las masas de agua costeras del País Vasco basada en la clorofila	96
ANEXO D – ACCIONES DE DIFUSIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO.....	97
BIBLIOGRAFÍA	99

1. OBJETIVOS

El proyecto titulado “*La clorofila, elemento clave para la Estrategia Marina Europea y la Directiva Marco del Agua: relación con los factores océano-meteorológicos en la plataforma costera vasca y empleo de la teledetección para la estimación de las concentraciones de clorofila*” (Ref. interna de AZTI IM11CLAVE) sobre el cual se redacta este informe final, se integra en la segunda prórroga del Convenio de Colaboración entre la Agencia Vasca del Agua y la Fundación AZTI Fundazioa suscrito con fecha 7 de octubre de 2008.

Este proyecto está enfocado, prioritariamente, a la evaluación de la calidad biológica y ambiental en el contexto de la Directiva Marco del Agua (2000/60/EC) y la Estrategia Marina Europea (2008/56/EC). Además, analiza la importancia del cambio climático en la tendencia a largo plazo de la biomasa fitoplanctónica. Su objetivo general es aplicar técnicas novedosas y específicas para la plataforma costera vasca, que permitan evaluar con un alto grado de fiabilidad el estado del fitoplancton, así como conocer los patrones de variación espacio-temporal de la clorofila “a” (chl-a) y su relación con los factores océano-meteorológicos. En este proyecto se esperaba la consecución de los siguientes resultados:

- **Algoritmo de la chl-a específico para la costa vasca** mediante el sensor satelital MODIS. Grado de fiabilidad de dicho algoritmo, respecto a los productos globales actuales.
- **Mapas de calidad del fitoplancton basados en el percentil 90 de la chl-a** para la plataforma costera del País Vasco. Comparativa del potencial de la teledetección para monitorizar la chl-a, respecto a las medidas “in situ” llevadas a cabo en las estaciones de muestreo de la Red de Calidad.
- **Profundizar en el conocimiento de la variabilidad espacio-temporal de la chl-a** en la plataforma costera (ciclo estacional típico, así como, frecuencia, magnitud y distribución espacial de los picos) y de los factores de control abióticos.
- **Tendencia a largo plazo de la chl-a**, a diferentes profundidades, y su posible relación con el cambio climático.

Este proyecto no contemplaba las tareas de adquisición de datos “in situ” (muestreos y analítica en laboratorio) ya que éstas se realizan dentro de otros proyectos financiados por el Gobierno Vasco (Red de Calidad y Variaciones).

Las tareas y objetivos específicos de este proyecto pueden agruparse en dos bloques principales:

- **Ánálisis de series temporales largas de chl-a y variables meteorológicas, hidrográficas y físico-químicas, y estudio de la relación entre dichas variables, en un radial costa-océano de la plataforma costera del País Vasco.** La finalidad de estas tareas es conocer el efecto de las condiciones del medio sobre la dinámica del fitoplancton. De esta manera, poder distinguir la influencia de los factores océano-meteorológicos (que responden a ciclos estacionales y tendencias climáticas globales), de la eutrofización (producida por la presión antrópica en la cuenca). Este conocimiento es necesario para interpretar los resultados de las evaluaciones y para la correcta toma de decisiones, a la hora de aplicar medidas de protección y mejora ambiental.
- **Desarrollo de un algoritmo específico para la zona de estudio, que permita una estima fiable de la chl-a a partir de imágenes de teledetección.** Con ello, se evaluaría la calidad del fitoplancton en la plataforma costera del País Vasco, con una alta frecuencia de toma de datos y una amplia cobertura espacial. La finalidad última de estas tareas es conseguir que las amplias redes de vigilancia ambiental del medio marino, requeridas por la Directiva Marco del Agua y la Estrategia Marina Europea, sean eficientes y rentables.

En este documento se describen las tareas técnicas llevadas a cabo durante los dos años de duración del proyecto (2011 y 2012).

2. INTRODUCCIÓN

Desde 1995, AZTI-Tecnalia lleva a cabo la red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la Comunidad Autónoma del País Vasco, que a partir de 2008 depende de la Agencia Vasca del Agua (URA), proyecto que denominamos, de aquí en adelante, “Red de Calidad”.

La “Red de Calidad” responde principalmente a la Directiva 2000/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, también conocida como Directiva Marco del Agua (DMA).

La DMA tiene como uno de sus objetivos principales el alcanzar el buen estado ecológico de todas las aguas europeas para el año 2015. Para ello, establece las bases del seguimiento del estado de las aguas superficiales y subterráneas. Además, en su anexo V, recoge los diferentes indicadores de calidad, definiciones de estado ecológico y estrategias para el establecimiento de las redes de seguimiento.

La DMA incluye al fitoplancton dentro de los indicadores de calidad, y considera que deben vigilarse su abundancia, composición y biomasa (European Commission, 2000).

Dentro de la “Red de Calidad” se mide la concentración de chl-a en las aguas de superficie, como estima de la biomasa fitoplanctónica. La información sobre el fitoplancton se completa con el análisis de su abundancia y composición taxonómica mediante microscopía.

Además, a la hora de interpretar los resultados se tienen en cuenta las variables físico-químicas del agua que más pueden influir en este indicador biológico (p. e., salinidad, nutrientes disueltos y turbidez).

Este control del fitoplancton para la DMA se realiza actualmente en 16 estaciones situadas en las masas de agua costeras, y en 3 estaciones de mar abierto sobre la plataforma (estaciones de referencia), además de los estuarios principales (32 estaciones) (Borja *et al.*, 2004, 2009). Las estaciones de mar abierto, consideradas de referencia por encontrarse muy alejadas de las fuentes de presión antrópica, se utilizan además para la implementación de la Estrategia Marina Europea (Borja *et al.*, 2011).

La Estrategia Marina Europea (2008/56/EC), que tiene como principal objetivo que los mares europeos alcancen el buen estado ambiental en 2020, y establece la necesidad de evaluar el estado ambiental utilizando varios descriptores cualitativos (European Commission, 2008). En cuanto al descriptor 5 (eutrofización antrópica), la Comisión Europea ha seleccionado un grupo de indicadores entre los que se incluyen algunas variables fitoplanctónicas, tales como la concentración de chl-a en la columna de agua, los cambios en la composición florística y las proliferaciones de microalgas dañinas causadas por actividades humanas (European Commission, 2010; Borja *et al.*, 2011).

Desde 1995 la frecuencia de muestreo empleada en la “Red de Calidad” para la monitorización de la chl-a y las variables físico-químicas del agua ha sido siempre trimestral. La abundancia celular y composición taxonómica se miden desde años más recientes de manera trimestral en las aguas costeras y marinas de referencia, así como en las estaciones más externas de los estuarios, mientras que en el tramo medio-interior estuaríco se miden sólo en primavera y verano (Borja *et al.*, 2010).

Para llevar a cabo este control del fitoplancton se realizan muestreos *in situ*, que implican el desplazamiento a la zona de muestreo, la toma de muestras de agua y su análisis posterior en el laboratorio.

La frecuencia mínima de muestreo que establece la DMA para el fitoplancton es de seis meses (European Commission, 2000). Sin embargo, debido a que este elemento biológico presenta una elevada variabilidad temporal en el medio marino, se ha criticado la utilización de frecuencias de

muestreo de este orden, e incluso mensuales y quincenales, por considerarlas insuficientes (Domingues *et al.*, 2008).

Las limitaciones de los muestreos *in situ* pueden superarse mediante información sinóptica y resolutiva (en tiempo y espacio) de los productos globales de concentración de chl-a proporcionados por los satélites de color del océano (Gohin *et al.*, 2008).

En particular, la alta frecuencia de adquisición de las imágenes (diaria), y la disponibilidad gratuita y rápida de las imágenes del sensor MODIS, así como el número de bandas espectrales en la región del espectro adecuado para la estimación de la clorofila, y la resolución espacial (1 km^2), hacen que las imágenes MODIS sean adecuadas para la estimación de chl-a superficial y el monitoreo de la calidad de las aguas. No obstante, la información satelital es poco precisa en aguas costeras, y su aplicación en zonas concretas debe ser validada.

Por lo tanto, uno de los objetivos principales de este estudio es estimar la concentración de clorofila mediante imágenes de satélite para evaluar su potencial en el monitoreo de la calidad de las aguas costeras de la CAPV, en el marco de la Directiva Marco del Agua (2000/60/EC) y la Estrategia Marina Europea (2008/56/EC).

Además, la adquisición de datos de chl-a con mayor frecuencia es recomendable para el estudio de las series temporales, ya que ello podría permitir la aplicación de análisis estadísticos más robustos (Revilla *et al.*, 2010). En este sentido, la información proporcionada por las herramientas de teledetección también es de elevado interés.

El presente proyecto se centra en la plataforma costera del País Vasco. El área de estudio se encuentra situada en el sudeste del golfo de Vizcaya, en la zona de cambio de orientación de este-oeste de la costa española a norte-sur de la costa francesa (Figura 1). En esta zona la influencia de las condiciones climáticas terrestres y de los aportes de aguas continentales es notablemente mayor que en zonas costeras más abiertas y menos continentalizadas (Valencia *et al.*, 2004).

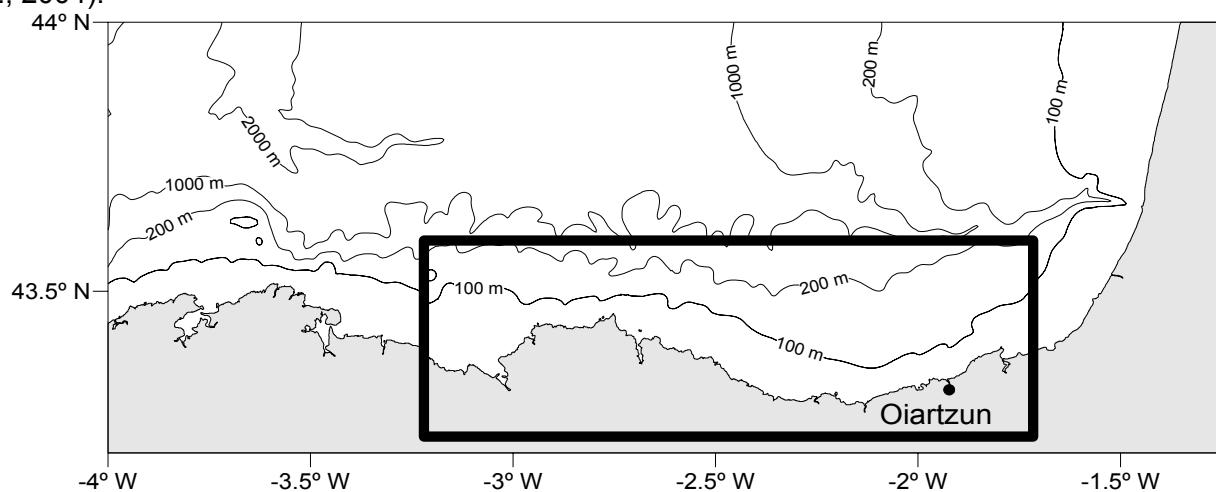


Figura 1. Zona de estudio. Plataforma continental del País Vasco.

En cuanto a series temporales de larga duración cabe destacar la existencia en la plataforma costera del País Vasco de la estación D2 (Figura 2), que se monitoriza desde 1986 hasta la actualidad dentro del proyecto “Variaciones”, financiado por el Dpto. de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno Vasco. La estación de referencia L-REF10 de la “Red de Calidad” coincide desde 2002 con la estación D2.

En 2000 se añadieron dentro del proyecto “Variaciones” otras dos estaciones frente a la desembocadura del estuario del Oiartzun: la D0 (coincidente con la estación L-OI20 de la “Red de Calidad”) y la D1. Con ello, se dispone de un radial costa-océano que cuenta hasta hoy con más de una década de información (Figura 2).

Si bien la información disponible sobre este radial en algunos aspectos puede considerarse limitada (basada principalmente en perfiles de CTD desde 1993), incluye por contra algunas variables fundamentales para comprender la influencia del cambio climático y de las presiones antrópicas locales sobre el fitoplancton.

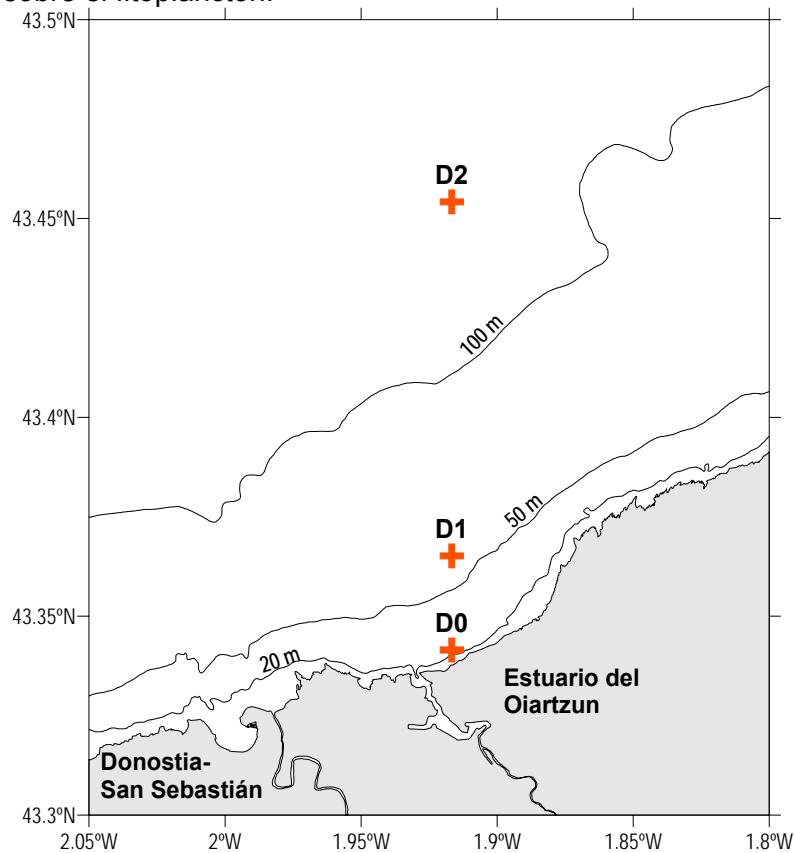


Figura 2. Localización del radial costa-océano frente al estuario del Oiartzun (Gipuzkoa).

Además, en el entorno próximo están disponibles series de datos de variables océano-meteorológicas muy interesantes, como la de la temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián, las series de datos atmosféricos del Observatorio de Monte Igeldo de Donostia-San Sebastián, la información sobre aportes fluviales de las cuencas francesas del Adour y la Gironde, etc.

Sobre variabilidad estacional, interanual y tendencias a largo plazo, tanto para la temperatura del agua del mar (en el Aquarium desde 1947), como para la atmosférica (en Igeldo desde 1928) se han realizado diferentes trabajos científicos en un contexto temporal más amplio que el de las series de la D2 (p.e., Goikoetxea *et al.*, 2009; González *et al.*, 2010; 2011a; 2011b).

Un estudio reciente sobre la estación D2 indica que, desde 1986, existe una leve tendencia de disminución de la chl-a en superficie, a la vez que se observa un aumento de la temperatura superficial del mar (Revilla *et al.*, 2010).

Además, dentro del proyecto *K-Egokitzen* (Eusko Jaurlaritza-Gobierno Vasco, Dpto. Industria, Innovación, Comercio y Turismo, Viceconsejería de Innovación y Tecnología, Dirección de Tecnología), se comenzó a investigar la tendencia temporal de la chl-a a otras profundidades en la columna de agua en la estación D2 y su relación con las variables océano-meteorológicas (temperatura del mar, caudales, insolación y patrones climáticos de escala global) (Gobierno Vasco, 2011).

Sin embargo, aún no se había estudiado la tendencia a largo plazo, de la clorofila y otras variables, en un radial costa-océano mediante técnicas estadísticas novedosas.

Por ello, el presente estudio pretende ahondar en el conocimiento de las tendencias a largo plazo de la clorofila y las variables océano-meteorológicas y físico-químicas de interés para la dinámica del fitoplancton, a lo largo de un transecto costa-océano; y tiene como uno de sus objetivos finales determinar cómo pueden afectar al fitoplancton los aportes antrópicos locales frente a los factores climáticos globales

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES LARGAS (≥ 10 AÑOS)

3.1.1 RECOPILACIÓN DE DATOS

En la Tabla 1 se muestra a modo de resumen las series de datos utilizadas para el análisis de ciclos y tendencias a largo plazo, así como de relaciones entre variables. En el Anexo A se puede encontrar una descripción más detallada de las series.

Tabla 1. Series de datos recopiladas. SST: *Sea Surface Temperature*. EA: *East Atlantic*. PAR: *Photosynthetically Active Radiation*.

Serie	Variables	Área	Fuente	Longitud serie	Frecuencia
Datos meteorológicos	Temperatura máx. y mín.	Observatorio Monte Igeldo 43° 18' N, 02° 02' O	AEMET (Agencia Estatal de Meteorología)	1928-2011	Diaria
	Insolación			1947-2011	Diaria
	Precipitación			1986-2011	Mensual
	Evaporación			1986-2011	Mensual
Aquarium	Temperatura superficial del mar (SST)	San Sebastián 43° 19' N, 02° 00' O	Aquarium (Sociedad Oceanográfica de Gipuzkoa)	1947-2011	Diaria
AMO	Temperatura superficial del mar promedio	Atlántico Norte	NOAA PSD http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/	1856-2011	Mensual
Adour	Caudal fluvial	Adour	HYDRO Database http://www.hydro.eaufrance.fr/	1967-2008	Diaria
Gironde	Caudal fluvial	Gironde	Autoridad portuaria de Burdeos	1952-2011	Diaria
Bidasoa	Caudal fluvial	Bidasoa	Confederación Hidrográfica del Cantábrico	1986-2009	Diaria
Patrón del Atlántico Este (EA)	Índice climático EA	Atlántica, Hemisferio Norte	Climate Prediction Centre (CPC) of the NCEP http://www.cpc.noaa.gov/	1950-2011	Mensual
Oscilación del Atlántico Norte (NAO)	Índice climático NAO				
Componentes viento	Balance Afloramiento-Hundimiento	45°N, 2.5°O	Reanálisis NCEP http://www.esrl.noaa.gov/psd	1986-2011	Mensual
Datos oceanográficos	Temperatura, salinidad y clorofila	D2	AZTI ("Variaciones")	1986-2011	Mensual aprox.
	PAR			1998-2011	
Datos oceanográficos	Temperatura, salinidad y clorofila	D0 y D1	AZTI ("Variaciones")	2000-2011	Mensual aprox.
Variables ambientales	Nutrientes, Secchi, Turbidez	D2 y D0	AZTI ("Red de Calidad")	2002-2011	Trimestral
SeaWiFS	Clorofila Satélite	D2 y D1	Daily SEAWIFS L3 9km images, from oceancolor.gsfc.nasa.gov .	1997-2010	Diaria aprox.

Para las variables meteorológicas se han utilizado las del Observatorio de Monte Igeldo (Donostia-San Sebastián).

- En el caso de la temperatura atmosférica, a partir de los datos diarios de temperatura máxima y mínima se ha calculado la media mensual, sobre la cual se han efectuado los análisis.
- La insolación (horas de sol), se registra con una frecuencia diaria. Para el análisis de la variabilidad intranual se han calculado las horas de sol acumuladas por mes; para el de la variabilidad a largo plazo se han utilizado horas de sol acumuladas por año.
- En el caso de la precipitación y la evaporación se dispone de valores mensuales acumulados.

Para el cálculo del balance afloramiento-hundimiento se han utilizado los datos de viento correspondientes al reanálisis NCEP (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>). El cálculo del balance afloramiento-hundimiento mensual se ha realizado siguiendo la metodología de Borja *et al.* (1996, 1998 y 2008).

Para la temperatura superficial del mar (SST), además de la estación D2, se han empleado dos series de datos de mayor longitud (más de 50 años): la serie del Aquarium de Donostia-San Sebastián y la serie AMO (Atlántico norte) de la NOAA.

En cuanto al caudal fluvial, se han recopilado los datos de las cuencas más importantes que vierten en el extremo sudeste del golfo de Vizcaya: los ríos franceses Adour y Gironde. Además se dispone de datos de caudal medio diario del Bidasoa.

Como índice climático representativo de la zona del sureste del golfo de Vizcaya se ha empleado la serie del Patrón del Atlántico Este, o EA (*East Atlantic Pattern*) (Barnston and Livezey, 1987). En algunos casos también se ha utilizado la serie NAO (Oscilación del Atlántico Norte), que es un índice más adecuado a escala hemisférica (Valencia *et al.*, 2009).

Las variables oceanográficas (SST, salinidad, clorofila, etc.) corresponden a las medidas *in situ* iniciadas en 1986, a varias profundidades, en la estación D2 (situada en mar abierto frente a Pasaia), así como en otras dos estaciones que se añadieron en años posteriores en el mismo radial costa-océano (Figura 2, Introducción).

Hasta 1992, las medidas se hicieron a profundidades discretas (0, 5, 10, 20, 30, 50, 75 y 100 m). A partir de 1993 los perfiles verticales fueron continuos, tomándose las medidas cada metro con un CTD.

Para el análisis de la clorofila-a, hasta 1992 se utilizó el método espectrofotométrico analizando muestras de agua tomadas con botella, filtradas y extraídas en acetona. A partir de 1993 se estimó la concentración de clorofila-a con la medida de fluorescencia *in situ* del CTD, llevándose a cabo calibraciones rutinarias del CTD con muestras naturales analizadas mediante espectrofotometría. En el Anexo A se describen con detalle las características de los perfiles verticales de clorofila-a (Figura 45 a Figura 54) obtenidos en el radial D.

Hasta 1992, para calcular el valor medio de las variables en la columna de agua se ha utilizado una interpolación lineal. Para años posteriores, se ha realizado una media aritmética con los valores de los perfiles verticales continuos del CTD.

Se dispone de datos de variables ambientales (nutrientes, disco de Secchi y turbidez) para las estaciones D2 y D0 (desde 2002), procedentes de la red de control y seguimiento de la calidad de las aguas superficiales de la Comunidad Autónoma del País Vasco (Red de Calidad), cuya frecuencia de adquisición de datos es trimestral.

Se han recopilado también datos de clorofila de satélite (SeaWiFS) en los píxeles (9 km x 9 km) más cercanos a las estaciones D2 y D1. En la estación D2 se obtuvieron datos con una frecuencia aproximadamente diaria y con ellos se calcularon medias mensuales. En la estación D1 el número de datos obtenido fue bastante menor y dio lugar a unas 4 medias mensuales por año.

Algunas variables oceanográficas complejas que describen las condiciones ópticas del agua se han calculado a partir del PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), tal y como se describe a continuación.

La profundidad de la zona fótica (Z_{eu}) se define como aquélla donde llega el 1% de la luz recibida justo bajo la superficie. De forma general, se acepta que la profundidad de compensación (es decir, la profundidad a la cual se igualan la fotosíntesis y la respiración) es similar a la profundidad de la zona fótica (Madariaga, 1987; 1989). Por lo tanto, en la capa fótica el fitoplancton puede mantenerse vivo y dar lugar a nueva biomasa, mientras que la clorofila que se detecta por debajo de la capa fótica deriva de células que están sedimentando, pero que no son productivas.

Para calcular la profundidad de la capa fótica (Z_{eu}) se han utilizado los perfiles verticales de PAR registrado en los muestreos *in situ* (Tabla 1). Como aproximación a Z_{eu} se ha tomado la profundidad a la cual el dato de PAR corresponde al 1% del valor registrado en el primer metro de profundidad.

El coeficiente de extinción luminosa (k) se ha calculado a partir de la profundidad de la capa fótica. Teniendo en cuenta que la variación vertical de la luz sigue la Ley de Beer-Lambert, la radiación recibida a una profundidad concreta es I_z ($E\ m^{-2}\ d^{-1}$) que se define como:

$$I_z = I_f \cdot e^{-kz}$$

Donde I_f ($E\ m^{-2}\ d^{-1}$) es la radiación medida justo bajo la superficie del agua, k (m^{-1}) es el coeficiente de atenuación luminosa y z (m) es la profundidad concreta.

El coeficiente de extinción, k , puede despejarse así en la anterior ecuación:

$$k = \frac{1}{z} \ln\left(\frac{I_f}{I_z}\right)$$

Finalmente el coeficiente de extinción (k) puede expresarse en función de la profundidad de la capa fótica, introduciendo en la anterior ecuación un valor teórico para la radiación medida justo bajo la superficie del agua (I_f). Así, si I_f es igual a $100\ E\ m^{-2}\ d^{-1}$, entonces a la profundidad donde llega la capa fótica (Z_{eu}), $I_z = 1\ E\ m^{-2}\ d^{-1}$, y la ecuación anterior queda como:

$$k = - (1/Z_{eu}) \cdot \ln (1/100)$$

$$k = (1/Z_{eu}) \cdot \ln (100)$$

$$k = 4,605 / Z_{eu}$$

La profundidad de visión del disco de Secchi (Z_s) también puede relacionarse con el coeficiente de extinción luminosa mediante el parámetro (J_s):

$$k \cdot Z_s = J_s$$

Normalmente, $1,3 < J_s < 1,8$. Este parámetro se establece de forma empírica (p. e., para el caso del estuario de Urdaibai, véase Madariaga, 1987).

3.1.2 CICLO ESTACIONAL

En el análisis de la variabilidad intranual de las series de datos se ha utilizado una técnica matemática de ajuste mediante funciones sinusoidales. Para ello se emplea una técnica de ajuste por mínimos cuadrados (esta técnica de minimización usa las ecuaciones normales, Press *et al.*, 1989; 1992) entre las medidas, y una combinación lineal de las ondas anuales y semianuales y submúltiplos. De este modo, las frecuencias (ω_n) son conocidas, t es el tiempo y las incógnitas son las amplitudes asociadas a cada variable (η_n). El valor asociado a la frecuencia 0, η_0 es el valor medio de la serie de datos.

$$\eta(t) = \eta_0 + \frac{1}{2} \sum_{n=-N}^N \eta_n \exp(i\omega_n t)$$

Esta técnica es ventajosa respecto a otras alternativas fundamentalmente por su sencillez y por permitir el uso de series de datos no equiespaciados o con huecos, tal como es el caso de esta serie (p. e., Revilla *et al.*, 2010).

El análisis de la variabilidad intranual se ha aplicado a las variables océano-meteorológicas (temperatura atmosférica, temperatura del mar, precipitación, caudales, etc.) y fitoplanctónicas (concentración de clorofila).

Los análisis en la estación D2 se han realizado con series que representan algo más de dos décadas (contabilizadas generalmente a partir de 1986), mientras que en las estaciones D0 y D1 sólo ha sido posible realizar el ajuste al ciclo estacional con los valores de la última década. Para aquellas variables cuya longitud es mayor (60-80 años) se ha realizado un análisis adicional con el total de los registros disponible.

3.1.3 TENDENCIAS TEMPORALES: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para analizar la evolución de las variables océano-meteorológicas a lo largo del tiempo se ha hecho uso de anomalías acumuladas. Las anomalías representan la desviación del valor de un mes concreto respecto al valor medio de la serie completa correspondiente a ese mismo mes. Las anomalías acumuladas son el resultado de sumar sucesivamente cada una de las anomalías mensuales.

Para el análisis de la tendencia a largo plazo de la clorofila y otras variables se aplicaron también otros métodos más novedosos, de tipo no paramétrico, resultado de la revisión que se describe a continuación.

Una amplia revisión de métodos para el análisis de series de datos climáticos puede consultarse en Mudelsee (2010). Cabe mencionar, en especial, la diferenciación existente entre métodos paramétricos, en los cuales se establece *a priori* una función que representa la variabilidad del proceso en la cual, diferentes parámetros libres se estiman, por ejemplo, mediante un método de mínimos cuadrados, o bien los métodos de ajuste no paramétrico, en los cuales no se impone una función que represente la variabilidad temporal del proceso.

Entre los modelos paramétricos se encuentra el ajuste lineal, modelos de regresión no-lineal, modelos de transición climática mediante rampa (Mudelsee, 2000) y modelos de cambio brusco de tendencia o de quiebro (Mudelsee, 2010). Una alternativa computacionalmente sencilla frente a los modelos paramétricos es el análisis de series de datos mediante medias móviles simples o ponderadas, que es muy comúnmente empleado en aplicaciones oceanográficas, en especial los análisis de registros de nivel del mar y corrientes (Pugh, 1987; 2004).

El filtro Kolmogorov-Zurbenko (KZ) es una alternativa sencilla para el estudio de tendencias y consiste en una aplicación iterativa de la técnica de medias móviles (Zurbenko, *et al.*, 1996). Su variante adaptativa, el filtro KZA, no supone un aumento importante de la complejidad algorítmica, tiene las ventajas de las aproximaciones no paramétricas, no requiriendo un modelo descriptivo de la variabilidad temporal de la serie (Yang y Zurbenko, 2010), y es una técnica especialmente indicada para detectar alteraciones abruptas en la serie (naturales o debidas a errores instrumentales, cambios en los equipos de medida, etc.), períodos de niveles medios uniformes o de variación lineal. Se han desarrollado diferentes códigos de tratamiento de series de datos para realizar los algoritmos numéricos anteriormente descritos. Sobre la aplicación de los métodos Kolmogorov-Zurbenko a series con saltos, cambios de tendencia, etc., puede consultarse González *et al.* (2011a, b).

3.2 EMPLEO DE LA TELEDETECCIÓN EN LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La elaboración de un algoritmo local para estimar la concentración de clorofila-a (chl-a) a partir de imágenes de satélite se ha realizado en base a medidas *in situ* (ópticas, chl-a) provenientes de campañas oceanográficas realizadas anteriormente en el marco de otros estudios (véase Novoa *et al.*, 2009 y Petus *et al.*, 2010).

Para la validación del algoritmo se comparó la predicción de éste con observaciones *in situ*, así como con otros algoritmos existentes. Además, se analizó su fiabilidad y robustez frente a la presencia de otros elementos en el agua como sólidos en suspensión.

Para la estima de la chl-a “satélite” en la plataforma costera se emplearon imágenes MODIS de un periodo reciente de 6 años. La calidad del fitoplancton en las aguas costeras y en las estaciones de referencia se ha llevado a cabo utilizando como indicador el percentil 90 de la chl-a (métrico aprobado oficialmente para la evaluación de la calidad del fitoplancton en la Directiva Marco del Agua, véase BOE, 2008), siguiendo la metodología indicada en Borja *et al.* (2010).

3.2.1 DATOS IN SITU

Los datos usados para este estudio fueron obtenidos de la Red de Calidad entre 2005 y 2010 y de campañas oceanográficas realizadas para ese fin. Las medidas de la Red de Calidad fueron realizadas cada tres meses. En cada estación, se consideró la concentración de chl-a estimada mediante fluorescencia en superficie (1 m de profundidad) realizado con CTD (SeaBird 25).

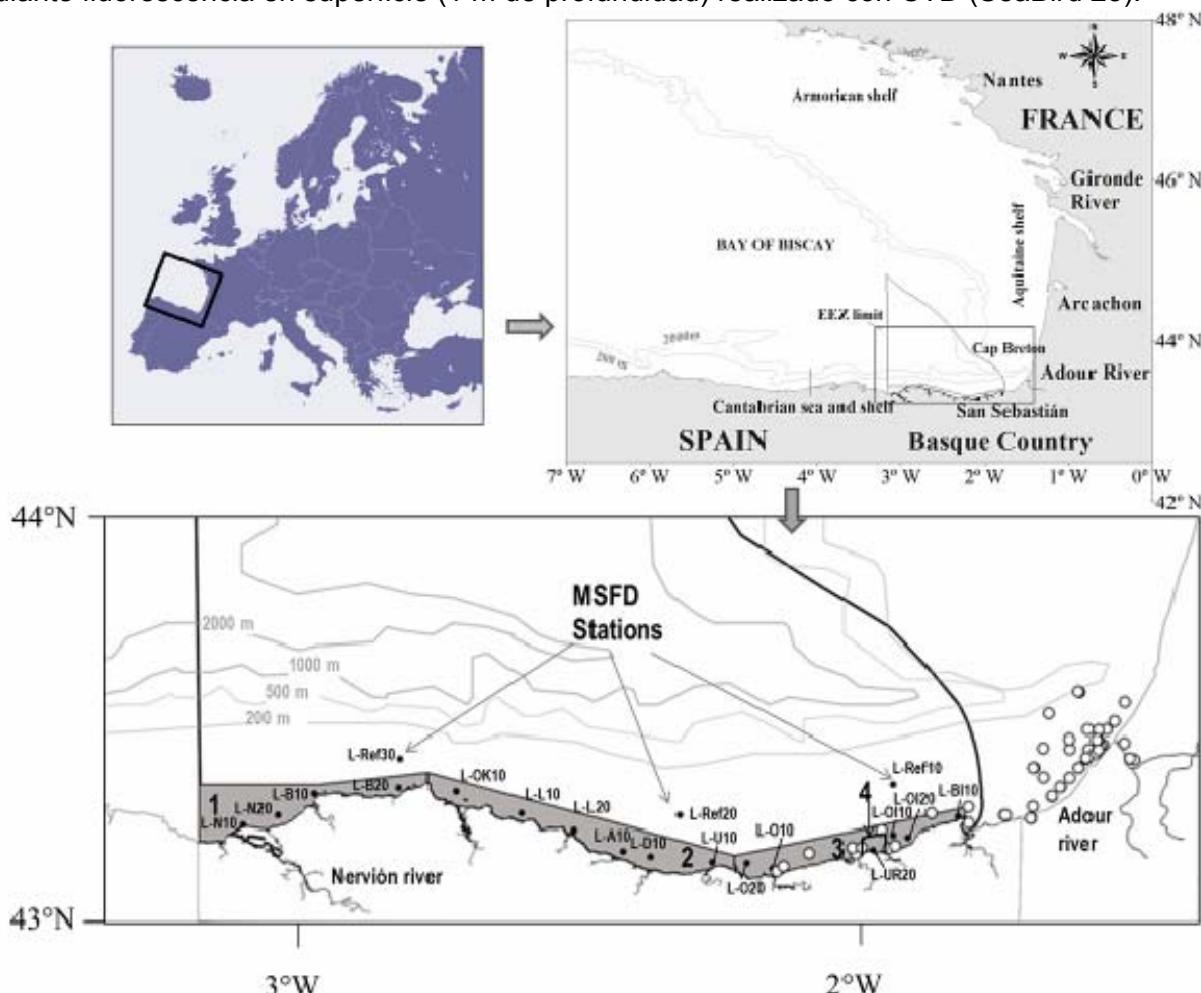


Figura 3. Área de estudio y localización de las medidas realizadas *in situ*.

En las campañas oceanográficas, realizadas en junio de 2007 y en abril y junio de 2009, se realizaron a la vez 64 medidas de chl-a por fluorescencia (con CTD) y con análisis espectrofotométrico (Figura 3), así como medidas espectrales mediante espectroradiómetros de campo TRIOS (Petus *et al.* 2010). Medidas simultáneas mensuales fueron también realizadas con los dos métodos en una estación costera cercana al emisario submarino de Mompás (estación L-UR20) durante un año completo (2009-2010). Ambas metodologías se compararon para evaluar su correspondencia.

3.2.2 IMÁGENES MODIS

Las imágenes seleccionadas para este estudio fueron las proporcionadas por el sensor MODIS. La alta frecuencia de adquisición de las imágenes (diaria), y la disponibilidad gratuita y rápida de éstas, el número de bandas espectrales en la región del espectro adecuado para la estimación de la clorofila, y la resolución espacial (1 km^2), hacen de las imágenes MODIS adecuadas para la estimación de chl-a superficial y el monitoreo de la calidad de las aguas.

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor a bordo de los satélites Terra y Aqua. Las dos plataformas están programadas para cubrir el sur-este del golfo de Vizcaya dos veces al día, por la mañana y por la tarde (URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>). MODIS adquiere 36 bandas espectrales, entre 415 y 14,235 nm, con resoluciones espaciales de 250 m (2 bandas), 500 m (5 bandas) y 1000 m (29 bandas).

Los productos MODIS level 1 (radiancias en lo alto de la atmósfera, calibrados y geoposicionados) fueron descargados del sitio ftp de MODIS (<ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) y convertidos a reflectividad (level 2) mediante SeaDAS. Un total de 962 imágenes MODIS correspondientes a la zona de estudio (Figura 3), sin nubes y adquiridas entre 2005 y 2010, fueron descargadas. Las imágenes MODIS fueron seleccionadas en base a sus ventajas (respecto a otros sensores como MERIS): alta frecuencia temporal (2 imágenes diarias) desde 2000 respecto 2-3 días por semana en MERIS, y facilidad de acceso.

3.2.3 ALGORITMOS DE CLOROFILA-A

La concentración de clorofila fue estimada mediante tres algoritmos, los cuales se compararon:

algoritmo OC3M, desarrollado por O'Reilly *et al.* (1998) y adaptado a MODIS,

algoritmo OC5 desarrollado por Gohin *et al.* (2002), y

un algoritmo local empírico desarrollado específicamente para el área de estudio a partir de datos adquiridos en dos campañas oceanográficas.

Las imágenes estándar de chl-a proporcionadas por la NASA's Ocean Color Group están basadas en el algoritmo empírico global OC3M. Dicho algoritmo, basado en medidas que van desde 0.0008 a 90 mg.m^{-3} , es definido como:

$$[\text{Chl}-a] = 10^{0.2830R + 2.753R + 1.457R^2 + 0.659R^3 - 1.403R^4}$$

$$R = \log_{10} \left[\frac{\max(R_{rs} 443, R_{rs} 489)}{R_{rs} 555} \right]$$

donde *max* es el mayor de los dos valores y $R_{rs}(\lambda)$ es la reflectividad de teledetección por encima del agua. Este algoritmo fue aplicado a las imágenes MODIS a través de SeaDAS y programación IDL.

El OC5 es un algoritmo empírico desarrollado para estimar chl-a en aguas costeras de caso 2 a partir de un Look-up Table (Gohin *et al.*, 2002). Este método deriva del algoritmo OC4 desarrollado por O'Reilly *et al.* (1998), y está basado en los mismos cocientes de bandas incluyendo la banda 412 nm. Dicha banda se utiliza para detectar errores en la señal en ambientes costeros cuando el agua contiene una concentración de material en suspensión elevada o cuando la concentración de aerosoles continentales en la atmósfera es elevada (Druon

et al. 2005). Este algoritmo ha sido validado en estaciones del golfo de Vizcaya, el Mar del Norte, y el norte del Mediterráneo (Gohin et al., 2011).

Los productos de chl-a de MODIS fueron descargados desde la Web de Ifremer (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/ocean-color/>).

Un algoritmo empírico específico para la zona costera vasca fue desarrollado mediante muestreos espectrales *in situ* y medidas biogeoquímicas (chl-a, Material en suspensión total, turbidez, disco de Secchi) realizadas en dos campañas oceanográficas *ad hoc*, llevadas a cabo en junio de 2007, y abril y junio de 2009.

El algoritmo fue desarrollado mediante regresión lineal del log de chl-a estimada por espectrofotometría y cocientes de bandas de reflectividad medidas *in situ*, y validado mediante datos adicionales. Mediante un procedimiento denominado *stepwise*, se seleccionaron los cocientes de bandas para seleccionar el mejor modelo posible de entre todas las combinaciones posibles con dichos predictores. Dicho algoritmo, originalmente desarrollado para imágenes del sensor MERIS, fue validado con medidas *in situ*, mostrando un buen ajuste por medio de validación por remuestreo jackknife ($r^2_{\text{jac}} = 0.67$), ver Figura 4.

Posteriormente, el algoritmo fue adaptado a las bandas del sensor MODIS tomando la siguiente forma:

$$[\text{Chl - a}] = 10^{\left[-0.18 - \left(5.85 \times \log_{10} \left(Rrs \left(\frac{531}{547} \right) \right) \right) - \left(5.56 \times \log_{10} \left(Rrs \left(\frac{678}{667} \right) \right) \right) + \left(0.442 \times \log_{10} \left(Rrs \left(\frac{748}{678} \right) \right) \right) \right]}$$

El algoritmo fue aplicado únicamente al rangopectral de reflectividad medidas *in situ* durante las campañas oceanográficas (Tabla 2).

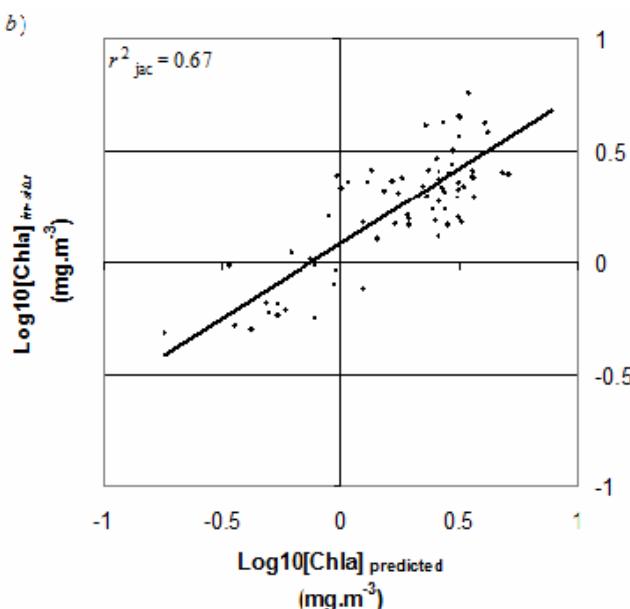


Figura 4. Correlación entre el algoritmo local desarrollado y las medidas realizadas *in situ* de chl-a.

Tabla 2. Rangos de reflectividad medidos *in situ* mediante el espectro-radiómetro de campo TRIOS.

Longitud de onda de la banda (nm)	Reflectividad mínima (sr-1)	Reflectividad máxima (sr-1)
531	2.3×10^{-3}	9.7×10^{-3}
547	2.1×10^{-3}	1.2×10^{-2}
667	2.7×10^{-4}	1.2×10^{-2}
678	3.1×10^{-5}	1.2×10^{-2}
748	3.8×10^{-5}	2.3×10^{-3}

La fiabilidad de los algoritmos fue evaluada mediante tres formas:

- Comparación del valor de chl-a *in situ* con el estimado por satélite en la misma zona y fecha (Gohin *et al.* 2008, 2011),
- Percentil 90 de los ciclos anuales de chl-a (Gohin *et al.* 2008, 2011), y
- Porcentaje del error mínimo cuadrático (RMSE). El RMSE fue calculado entre los datos *in situ* y el algoritmo mediante:

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{est,i} - P_{in-situ,i})^2}{N}} \times 100$$

El valor resultante del RMSE fue promediado de tres maneras: (i) para el año completo, (ii) para los meses en los que la concentración de chl-a es elevada (octubre y marzo), y (iii) para los meses con concentración de chl-a menor (de abril a septiembre).

Se calculó también la desviación estándar por estación y masa de agua, para estimar la incertidumbre asociada al diferente número de medidas tomadas por los dos métodos.

3.2.4 CÁLCULO DEL PERCENTIL 90 Y CLASIFICACIÓN DEL ESTADO

El percentil 90 (P90) fue calculado con los datos de chl-a, derivada de satélite y muestreada *in situ*. Para el cálculo a partir de las imágenes de satélite, se utilizó la función IDL “Quantile” (Becker *et al.*, 1988; Hyndman y Fan, 1996).

Los mapas de P90 de chl-a fueron generados para el periodo 2005-2010. En primer lugar, seleccionando las imágenes sin nubosidad. En segundo lugar, se calculó el valor de P90 para cada pixel de la imagen para todo el periodo y para cada mes del año. El P90 por mes se utilizó para caracterizar la evolución anual de la chl-a.

Adicionalmente, se obtuvo el P90 del material en suspensión total (TSM) para el mismo periodo. El algoritmo utilizado para estimar el TSM fue el desarrollado por Petus *et al.* (2009), el cual específico para el área de estudio.

Se estableció el rango de concentraciones P90 correspondientes a la clasificación del estado de calidad biológica del fitoplancton: Alto/Bueno/Moderado/Pobre/Malo (Revilla *et al.*, 2008; 2009). Cada zona (estaciones de las campañas de la Red de Calidad o píxeles de las imágenes de satélite) fue asignada a un estado de calidad de acuerdo con el valor de P90 *in situ*. A partir de dicha asignación se generó un mapa del estado de la calidad para cada tipo de estimación de chl-a.

3.2.5 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS DE RÍOS

Las descargas de los ríos en aguas costeras son un elemento importante de la dinámica del fitoplancton en el golfo de Vizcaya. En este apartado se describe la variabilidad espacial y temporal de la clorofila en relación a la descarga de los ríos del País Vasco, a escala diaria (respuesta a eventos de fuertes precipitaciones), estacional e interanual. Además, se estudia la influencia de las descargas de los ríos en la calidad de las aguas costeras colindantes.

Se han utilizado imágenes de satélite del sensor MODIS, datos medidos *in situ* durante las campañas de la Red de Calidad del País Vasco, datos hidrológicos de la Diputación Foral de Vizcaya, de la Diputación Foral de Gipuzkoa y de la agencia francesa DIREN (Directions Régionales de l'Environement).

A partir de imágenes MODIS se calcularon los valores de clorofila (algoritmo OC5), turbidez y sólidos en suspensión (algoritmo PETUS *et al.*, 2009). Para comparar con valores *in situ* de las estaciones de muestreo de la Red de Calidad, se extrajeron los valores promedio de una ventana de 3 x 3 píxeles alrededor de la localización de cada estación.

Para el estudio de las respuestas diarias de la clorofila a eventos fuertes de lluvias se seleccionaron las imágenes anteriores (11-01-2009) y posteriores (14-01-2009) al 13 de Enero del 2009 (día en el que se registraron valores de precipitación importantes), y se compararon con los datos *in situ* en frente a la desembocadura del río Nervión. Este análisis no pudo ser reproducido en la desembocadura del Adour por la ausencia de datos disponibles en esta zona en el mismo periodo.

Para el estudio de la variabilidad estacional de la clorofila costera, se calcularon las imágenes de P90 y los promedios mensuales de clorofila, se extrajeron los valores de las ventanas 3 x 3 alrededor de las posiciones de las estaciones de referencia y se relacionaron con los valores de las estaciones de costeras situadas frente a las desembocaduras del Nervión y del Adour.

Para el estudio de las áreas de influencia de las plumas de los ríos se extrajeron los valores de P90 mensuales en polígonos adyacentes a las desembocaduras del Nervión y Adour, respectivamente (Figura 5).



Figura 5. Polígonos seleccionados para la extracción de datos de las imágenes MODIS con el objeto de estudiar las áreas de influencia de las plumas del Nervión y Adour.

Finalmente se estudiaron las tendencias temporales de la clorofila estimada a partir de satélite extrayendo los valores quincenales medios de clorofila, TSM y turbidez de los 3 x 3 píxeles adyacentes a las posiciones de las estaciones de la Red de Calidad de las aguas del País Vasco, para evitar tener valores nulos en la serie, y se compararon con los resultados trimestrales obtenidos *in situ* en estas mismas posiciones, y con los valores diarios de precipitación y caudal de los ríos.

Cada serie fue analizada mediante la rutina “decompose” de R, mediante la cual se aísla la componente de tendencia para cada variable extrayendo de la serie la componente estacional. Despues se generaron regresiones lineales de esta componente contra la variable “año”, se calculó el p-value de la pendiente y se calculó la significancia de este valor para aceptar o rechazar la hipótesis nula (“pendiente = 0 ó tendencia nula”) con el método de Davison y Hinkley (1997).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 SERIES TEMPORALES LARGAS

4.1.1 CICLO ESTACIONAL EN EL ENTORNO DE LA ESTACIÓN D2 (OFFSHORE)

En la Tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en las variables medidas en el entorno de la estación D2.

Tabla 3. Ajuste de las series de datos de la estación D2 al ciclo estacional. Se muestran los coeficientes de la combinación lineal del ajuste estadístico, el RMSE (*Root Mean Square Error*) entre los valores medios mensuales y la función de ajuste, y el coeficiente de correlación de Spearman (r^2).

Variable	Serie de datos	Media	Anual	Semianual	RMSE	r^2
Insolación acumulada (días)	Igeldo (1947-2010)	5,98	2,30	0,30	0,10	0,99
	Igeldo (1986-2010)	6,38	2,30	0,38	0,21	0,99
Temp. Atmosférica (°C)	Igeldo (1928-2010)	13,22	5,63	0,76	0,21	0,99
	Igeldo (1986-2010)	13,62	5,55	0,69	0,33	0,99
Temp. Superficial Mar (°C)	Aquarium (1947-2010)	16,12	5,00	0,77	0,09	0,99
	Aquarium (1986-2010)	16,15	5,09	0,86	0,14	0,97
	D2 (1986-2010)	16,65	5,11	0,92	0,17	0,99
Precipitación (mm)	Igeldo (1986-2010)	121	26	20	11	0,78
Evaporación (mm)	Igeldo (1986-2010)	77	14	8	7	0,66
Caudal (m ³ .s ⁻¹)	Adour (1986-2008)	268	133	53	18	0,85
	Gironde (1986-2010)	815	485	95	58	0,90
	Bidasoa (1986-2009)	23,8	17,8	1,5	3,8	0,87
Salinidad superficial (UPS)	D2 (1986-2011)	34,84	0,24	0,06	0,16	0,58
	D2 (1986-2011)	35,45	0,03	0,02	0,03	0,21
Afloramiento-hundimiento	D2 (1986-2011)	-287	198	72	41	0,93
Prof. capa fótica (m)	D2 (1998-2011)	45,04	7,57	2,37	2,78	0,84
Coeficiente Extinción (m ⁻¹)	D2 (1998-2011)	0,11	0,016	0,005	0,013	0,62
Clorofila SeaWiFS (µg.l ⁻¹)	D2 (1997-2010)	0,99	0,48	0,05	0,16	0,85
Clorofila superficial (µg.l ⁻¹)	D2 (1986-2011)	0,59	0,27	0,07	0,10	0,83
Clorofila hasta 50 m (µg.l ⁻¹)	D2 (1986-2011)	0,60	0,25	0,13	0,07	0,67
Clorofila hasta 100 m (µg.l ⁻¹)	D2 (1986-2011)	0,41	0,15	0,08	0,04	0,59

Insolación, temperatura atmosférica y SST

El modelo de ajuste estacional representa en torno al 99% de la variabilidad de los datos de insolación, temperatura atmosférica y temperatura superficial del agua de mar (SST) (Tabla 3). El ciclo estacional de estas variables es muy marcado, típico de zonas de latitudes medias y clima templado.

En el caso de la insolación, en la Figura 6a se muestran los resultados para la serie completa (1947-2010) y en la Figura 6b para el periodo actual (1986-2010). Aunque la amplitud de la variación estacional no presenta diferencias entre ambas series, los valores mensuales tienden a ser algo más altos en la época actual. Con todos los datos en conjunto, el valor medio mensual de insolación para el periodo 1947-2010 supone 5,98 días y para el periodo 1986-2010 es 6,38 días (Tabla 3). Por lo tanto, en las últimas décadas la insolación (horas de sol) parece haber aumentado.

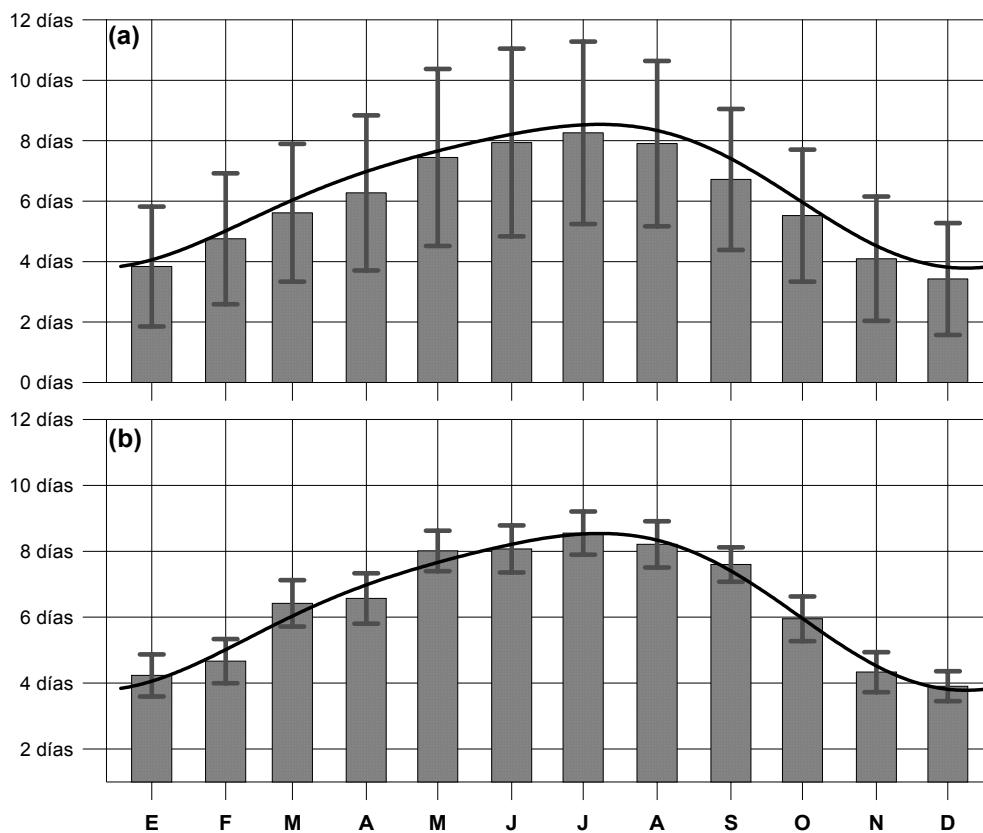


Figura 6. Variabilidad intranual de la insolación mensual acumulada en el Observatorio de Monte Igeldo (a) 1947-2010 y (b) 1986-2010. Para cada mes se muestra la media \pm desviación estándar. La línea continua es el ajuste obtenido con el valor medio y dos funciones sinusoidales (anual y semianual).

En cuanto a la temperatura atmosférica, el valor medio de la serie completa (1928-2010) es 13,22°C, mientras que el valor medio del periodo actual (1986-2010) es 13,62°C (Tabla 3). Esta diferencia de 0,4°C indica que los últimos 25 años han sido apreciablemente más cálidos. Comparando las dos épocas, las diferencias en la oscilación anual y la semianual son pequeñas. Sin embargo, se pueden percibir incrementos en los valores medios mensuales entre la serie completa y la actual; dichos cambios son mayores en los meses de otoño e invierno, que en los de primavera y verano (Figura 7).

Para la temperatura superficial del mar (SST) se ha realizado el análisis con los datos de la D2 en el periodo 1986-2010 (Figura 8a), con los del Aquarium en el periodo coincidente (Figura 8b) y con los del Aquarium considerando un periodo más largo (1947-2010) (Figura 8c). En los tres casos el modelo representa prácticamente toda la variabilidad de la SST, si bien el mejor ajuste en términos de RMSE se obtiene con la serie completa del Aquarium (Tabla 3). La SST promedio de la estación D2 es ligeramente mayor que la del Aquarium, unos 0,5°C, tanto en el periodo coincidente (1986-2010), como en el periodo completo (1947-2010).

El máximo anual de SST, unos 22°C, se produce a mediados de agosto mientras que el mínimo (12,5°C en la D2 y 12°C en el Aquarium) ocurre entre enero y febrero. La amplitud de la oscilación anual (la diferencia entre el máximo y el mínimo anuales) es muy similar entre la D2 y la serie del Aquarium (1986-2010). Aunque el valor medio de la SST del Aquarium desde 1947 y desde 1986 es prácticamente idéntico (en torno a 16°C), sí parece observarse en el periodo más reciente un aumento de la oscilación anual (casi 0,1°C respecto al periodo completo) y un adelanto de algunos días en producirse el mínimo y el máximo anuales.

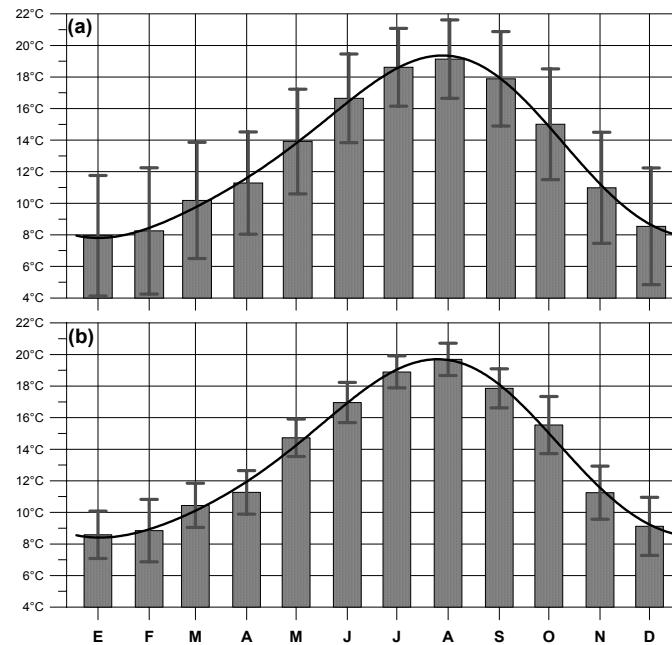


Figura 7. Variabilidad intranual de la temperatura atmosférica en Igeldo. (a) 1928-2010 y (b) 1986-2010. Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

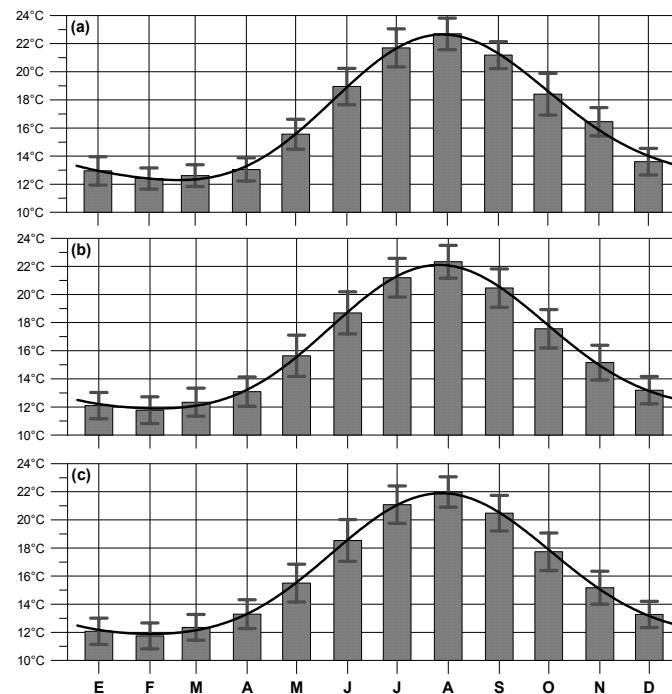


Figura 8. Variabilidad intranual de la SST: (a) D2 (1986-2010), (b) Aquarium (1986-2010), (c) Aquarium (1947 y 2010). Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Precipitación y evaporación

En la Figura 9a se representa el ciclo anual de la precipitación y en la Figura 9b el de la evaporación. Las series analizadas son del Observatorio de Monte Igeldo (AEMET) entre 1986 y 2010. Las desviaciones estándar respecto a las medias mensuales son más altas que en el caso de la insolación y la temperatura. Esto pone de manifiesto que la precipitación y la evaporación presentan importantes variaciones interanuales.

La precipitación muestra los valores máximos a finales de otoño (noviembre) y en primavera (abril), mientras que el mínimo se observa en verano (julio). No obstante, el patrón estacional no está muy marcado (Figura 9a).

El modelo de ajuste explica el 78 y el 66%, respectivamente, de la precipitación y la evaporación (Tabla 3). Los coeficientes de correlación son notablemente inferiores a los de la insolación y la temperatura, fundamentalmente porque la estacionalidad de la precipitación y la evaporación es menor y la desviación estándar de las medias mensuales es muy alta.

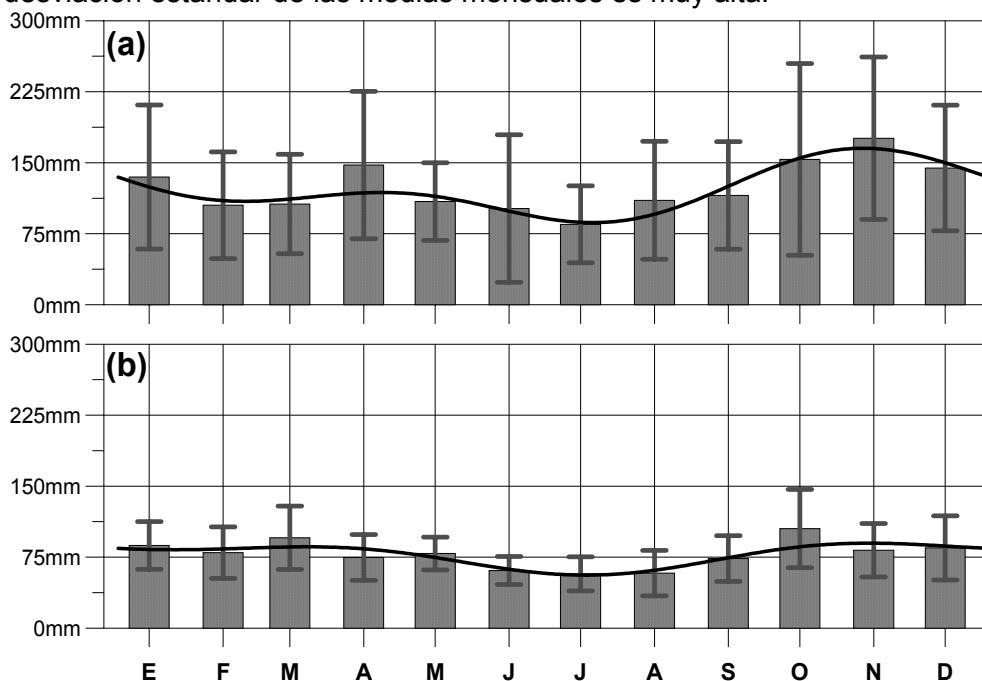


Figura 9. Datos del Observatorio de Monte Igeldo (1986-2010): (a) precipitación mensual acumulada, y (b) evaporación mensual acumulada. Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Caudal fluvial

Para los caudales de los ríos Adour, Gironde y Bidasoa, el modelo de ajuste explica entre el 85% y el 90% de la variabilidad (Tabla 3). Los ríos franceses (Adour y Gironde) presentan una fuerte estacionalidad (Figura 10a, b). El estiaje de ambos es notable, tanto en lo que se refiere a los valores medios mensuales, como a la desviación estándar de los mismos (julio-septiembre).

El Bidasoa muestra un comportamiento estacional muy similar al de los ríos franceses, si bien el estiaje es algo más prolongado y la desviación típica mensual es relativamente más alta (Figura 10c).

En los tres casos se observan los caudales medios más elevados en invierno y un repunte en abril, e incluso en mayo, debido al deshielo primaveral.

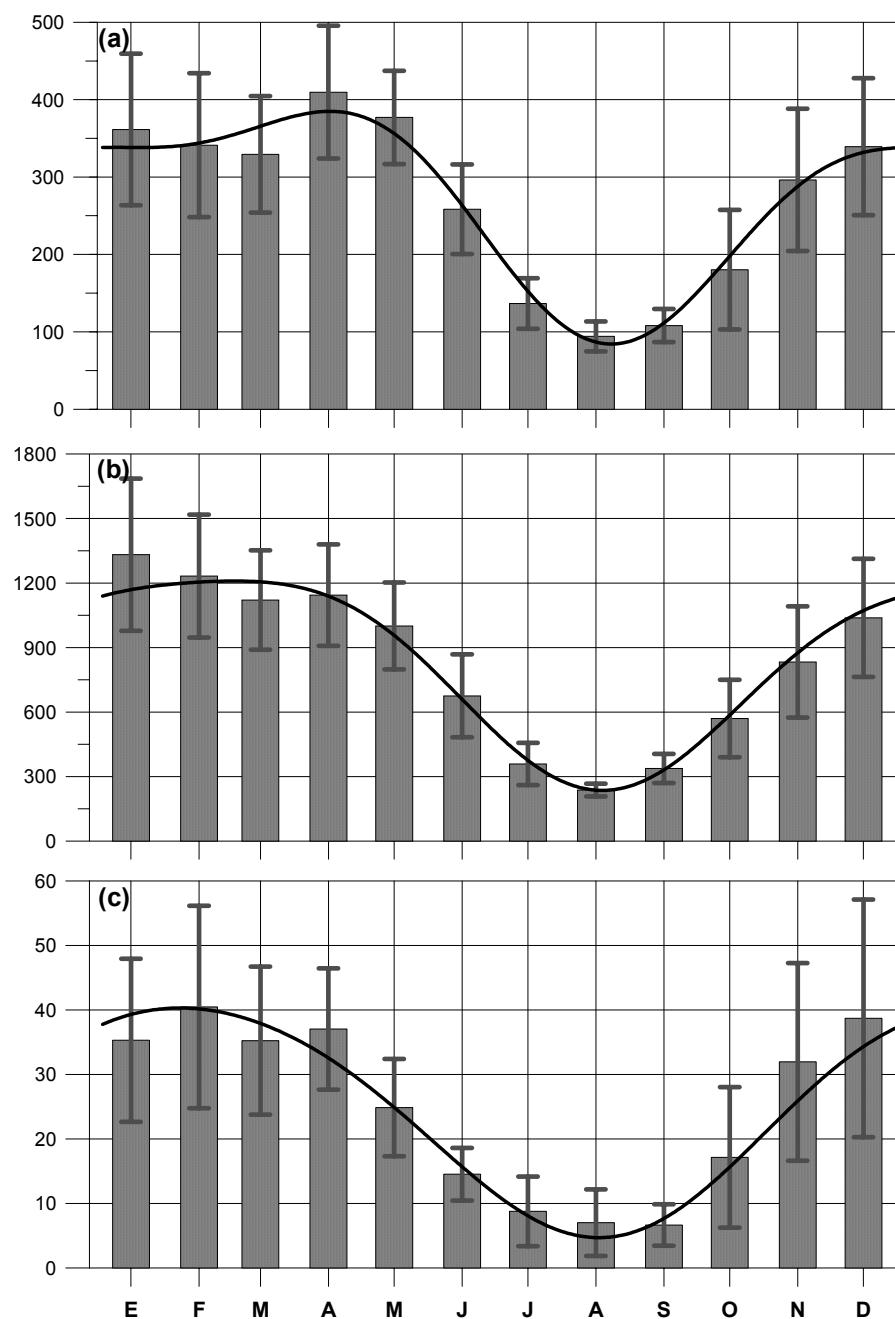


Figura 10. Variabilidad anual del caudal en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para (a) el Adour (1986-2008), (b) el Gironde (1986-2010) y (c) el Bidasoa (1986-2009). Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Salinidad

El valor promedio de la salinidad en superficie (0-1 m) para los últimos 26 años es 34,8 UPS (Tabla 3) lo que implica que el contenido de agua dulce procedente de aportes continentales y lluvia representa un 2,2% en dicho periodo.

En la Figura 11a se encuentra la salinidad superficial promediada mensualmente, así como su ajuste estadístico a un ciclo anual. El modelo indica que la salinidad presenta los valores más altos entre octubre y enero (cerca a 35 UPS), posteriormente va en descenso, hasta julio, cuando llega a unos 34,6 UPS y comienza de nuevo a ascender. En promedio, el mes de abril presenta el valor mínimo.

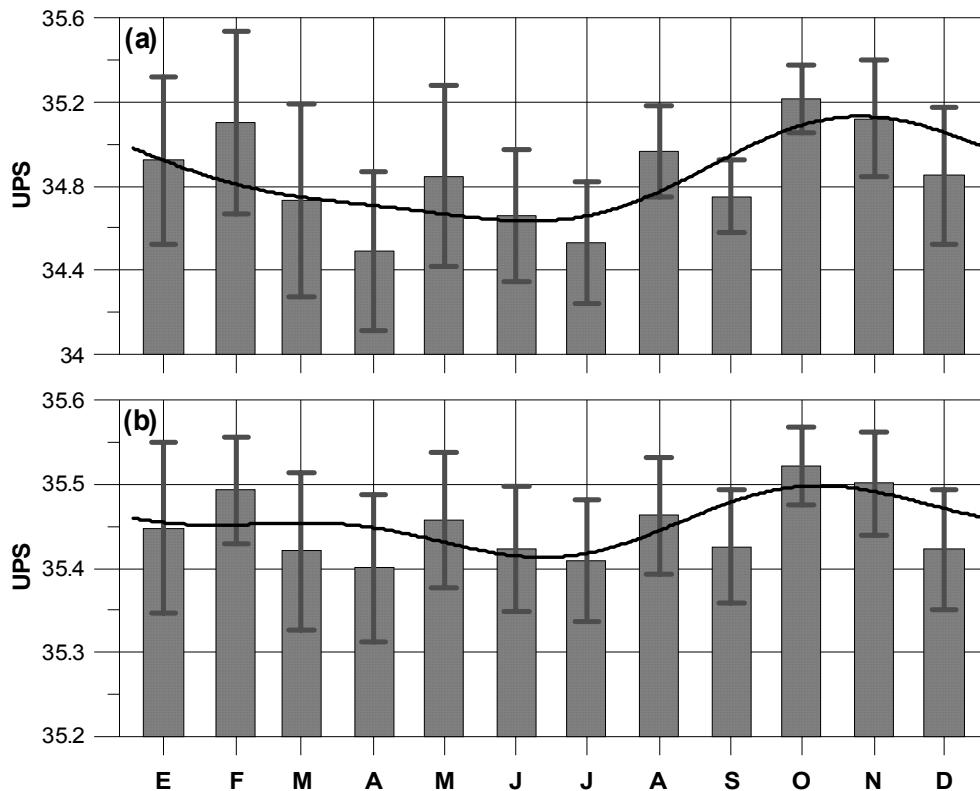


Figura 11. Estación D2 (1986-2011), variabilidad anual de la salinidad (a) superficial y (b) promediada hasta 100 m. Se muestra la media mensual $\pm \frac{1}{2}$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Como puede verse en la Tabla 3, el modelo de ajuste explica sólo el 58% de la variabilidad de los datos de la salinidad superficial. Además, la desviación estándar de cada mes es importante, lo que supone una gran variación interanual.

La salinidad promediada en la columna de agua (hasta 100 m de profundidad) varía en el conjunto total de los datos entre 35,0 y 35,8 UPS (Anexo A, Figura 56b). Los valores mensuales medios de la serie oscilan en un rango muy estrecho (entre 35,4 y 35,5 UPS), mientras que su variabilidad interanual es superior (Figura 11b). Por ello, el modelo de ajuste al ciclo anual explica muy poco porcentaje de la variabilidad de los datos (21%); el RMSE obtenido es similar a la amplitud de la onda anual y mayor que la semianual, lo que sugiere que la variabilidad estacional no queda bien representada con el modelo empleado (Tabla 3).

Valencia *et al.* (2004) también comentan que en esta zona de la plataforma los ciclos anuales de la salinidad superficial y la salinidad integrada en la columna de agua muestran un gran ruido de fondo debido a la elevada variabilidad temporal de las condiciones océano-meteorológicas (precipitación, balance precipitación-evaporación, y aportes fluviales). El valor promedio de salinidad en la columna de agua, al igual que en el caso de la temperatura, puede interpretarse como un integrador de las condiciones meteorológicas previas, dependiendo también de los desplazamientos horizontales de las masas de agua.

Estabilidad vertical de la columna de agua

La estructura física de la columna de agua influye en la dinámica del fitoplancton. Así, la mezcla invernal favorece el aporte de nutrientes desde las capas profundas hasta las superficiales, lo que determina la producción nueva anual. Por otra parte, la estratificación térmica que caracteriza la época estival en nuestras latitudes es un factor de limitación de la producción fitoplanctónica en superficie, al disminuir la concentración de nutrientes en esta capa debido a los procesos de consumo.

En este informe se ha analizado la serie del balance afloramiento-hundimiento, ya que es un factor que influye en la estructura física de la columna de agua. En general, se asume que para balances negativos (prevalencia de los procesos de hundimiento) a valores más bajos se produce una mayor turbulencia y aumenta el grosor de la capa de mezcla en la columna de agua. Lo contrario ocurre si se relaja el hundimiento (valores cercanos a cero): la estabilidad favorece la estratificación vertical y disminuye el grosor de la capa superficial de la columna de agua (Valencia *et al.*, 2004).

El modelo de ajuste estacional explica el 93% de la variabilidad de los datos del balance afloramiento-hundimiento (Tabla 3).

Como puede observarse en la Figura 12, a lo largo del año el balance en el área de estudio es fundamentalmente negativo (prevalencia del hundimiento). La intensidad del hundimiento aumenta en los meses de otoño e invierno (principalmente desde noviembre hasta febrero, con balances entre -400 y $-600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$). Por el contrario, el balance muestra valores bastante uniformes y más altos a finales de primavera y en verano (en torno a $-200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$), lo que favorecería la estabilidad de la columna de agua y su estratificación vertical en esa época.

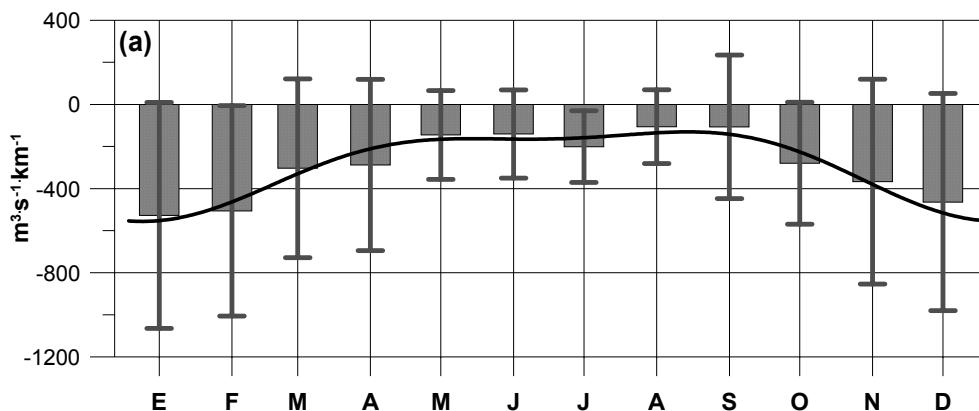


Figura 12. Estación D2 (1986-2011), variabilidad anual del balance afloramiento-hundimiento. Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Condiciones ópticas

En la Figura 13 se muestra la variación anual de la profundidad de la capa fótica (Z_{eu}) y el coeficiente de extinción luminosa (k) en la estación D2, ambos calculados a partir de los perfiles de PAR entre los años 1998 y 2011. En el caso de la capa fótica, el 84% de su variabilidad queda explicada por el modelo del ciclo anual, mientras que para el coeficiente de extinción es el 62% (Tabla 3).

En el conjunto de los datos la profundidad de la capa fótica oscila entre 17 y 75 m, su valor medio \pm desviación típica es $46 \pm 13 \text{ m}$ ($n= 103$). El modelo estadístico indica una media de 45 m, con una oscilación anual entre 37 y 53 m (Tabla 3; Figura 13a). Estos valores son algo superiores a los que citan Bode *et al.* (2004; 2011) para la costa gallega, donde habitualmente oscila entre 30 y 45 m. Esto puede explicarse por la mayor productividad de las aguas de Galicia, siendo el fitoplancton uno de los principales factores que contribuyen a las condiciones ópticas del agua (Valencia y Franco, 2004). Estacionalmente, la capa fótica alcanza su mayor profundidad en

verano, y muestra los valores mínimos a comienzos de la primavera. Este ciclo es inverso al de la concentración de clorofila, como se verá más adelante (Figura 14).

El coeficiente de atenuación luminosa en la estación D2 oscila entre $0,06$ y $0,28\text{ m}^{-1}$, su valor medio \pm desviación típica es $0,11 \pm 0,04\text{ m}^{-1}$ ($n= 103$). El modelo indica que su ciclo anual es inverso al de la profundidad de la capa fótica (Figura 13).

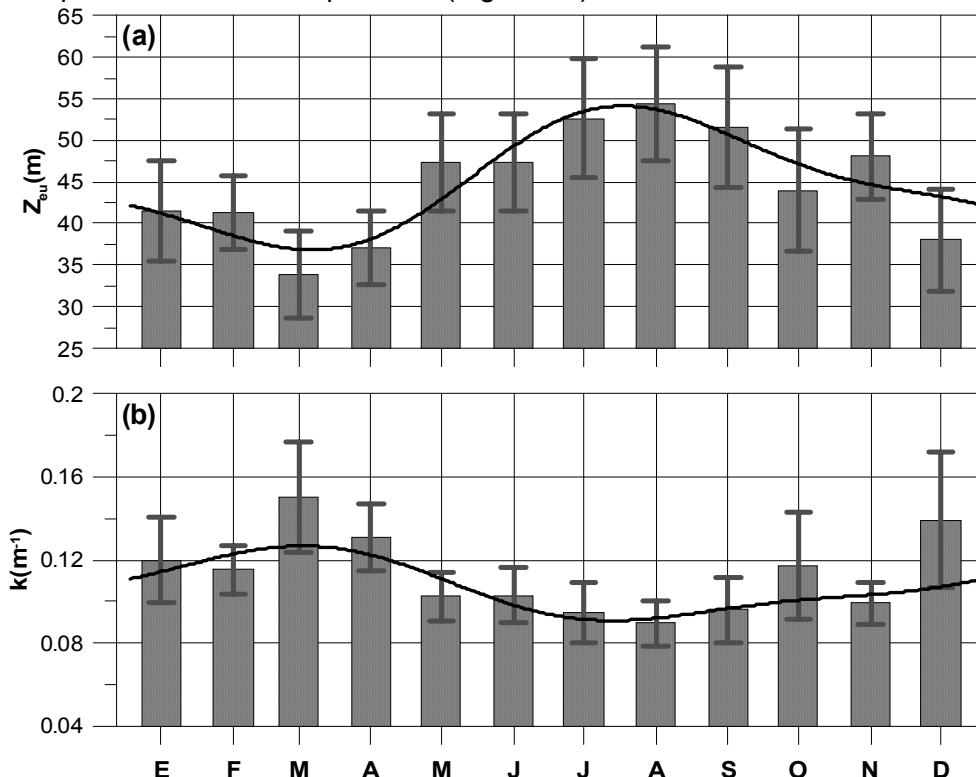


Figura 13. Estación D2 (1998-2011), variabilidad anual de (a) Profundidad de la capa fótica (Z_{eu}), y (b) Coeficiente de extinción luminosa (k). Se muestra la media mensual \pm $1/2$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Los datos de profundidad de visión del disco de Secchi para la estación D2 pueden consultarse en el Anexo A, Figura 63a. La profundidad varía entre 2 y 17 m, aunque en la mayoría de los casos está comprendida entre 8 y 15 m. El promedio es $10,6 \pm 3,3\text{ m}$ ($n= 59$). Estos valores son típicos de las aguas internas de la plataforma del País Vasco, mientras que en la zona media y externa el rango se extiende hasta 25 m y ocasionalmente se pueden encontrar valores superiores a 30 m (Valencia *et al.*, 1989). En la estación D2, situada a unos 13 km de la línea de costa, la influencia de la pluma costera del Adour puede explicar estos valores de transparencia propios de zonas algo más internas.

En la D2 no se ha encontrado una relación consistente entre el coeficiente de extinción luminosa estimado con el PAR y la profundidad de visión del disco de Secchi. Probablemente esto sea debido a la heterogeneidad vertical de la columna de agua (por ejemplo, por una haloclinia acentuada, aportes terrestres en superficie o acumulaciones de clorofila a diferentes profundidades) (Valencia y Franco, 2004).

En la literatura se cita el parámetro J_S como una constante de correspondencia entre la profundidad de visión del disco de Secchi (Z_S) y el coeficiente de extinción luminosa (k), que se establece de la siguiente forma: $k \cdot Z_S = J_S$. Normalmente, $1,3 < J_S < 1,8$ (Madariaga, 1987). Utilizando los valores medios de ambas variables obtenidos en la estación D2, el valor de J_S resultante es 1,2. Sin embargo, aumenta hasta 1,4 si consideramos únicamente los casos con $Z_S > 12\text{ m}$. Valencia y Franco (2004) también indican que la mejor correspondencia entre los coeficientes calculados a partir de medidas fotométricas y a partir de Secchi se encuentra cuando la profundidad de visión del disco de Secchi es relativamente alta, superior a 15 m.

Clorofila (SeaWiFS e in situ)

En la estación D2, el modelo de ajuste del ciclo anual explica algo más del 80% de la variabilidad de la concentración de clorofila superficial (tanto la obtenida mediante teledetección, como la medida *in situ*). Para el promedio de las medidas *in situ* hasta 50 m explica el 67%, y para el promedio hasta 100 m el 59% (Tabla 3).

Tanto para la clorofila satélite (Figura 14a), como para la clorofila *in situ* a distintas profundidades de integración (Figura 14b, c, d), la media mensual más alta se registra en marzo, esto es, en la transición entre invierno y primavera.

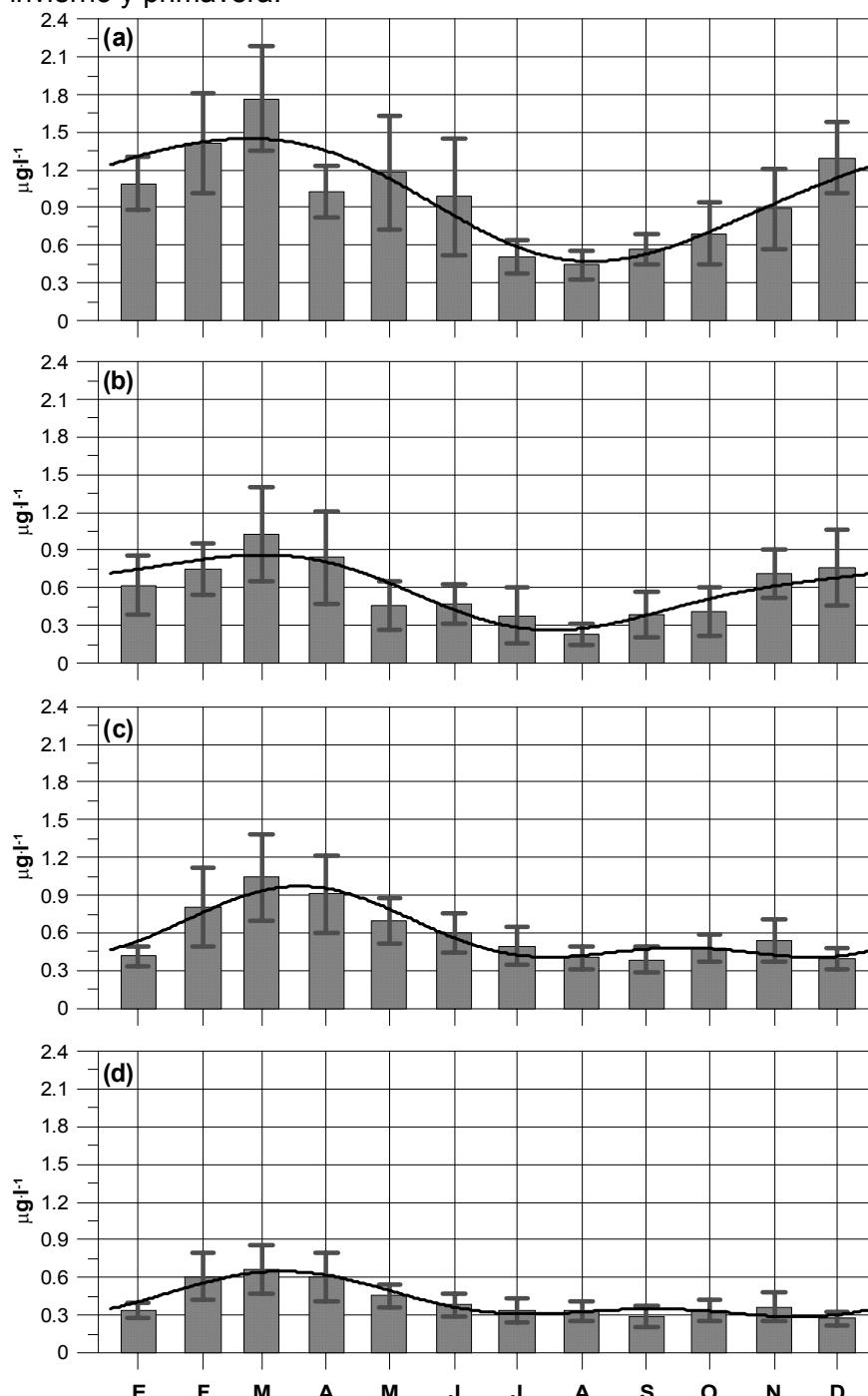


Figura 14. Estación D2, variabilidad anual de la concentración de clorofila satélite (1997-2010) e *in situ* (1986-2011). (a) SeaWiFS, (b) *in situ* superficial, (c) *in situ* promediada hasta 50 m y (d) *in situ* promediada hasta 100 m. Se muestra la media mensual $\pm \frac{1}{2}$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

En cuanto al mínimo anual, mientras que en la capa superficial (satélite e *in situ*) está claramente definido y se produce en los meses más cálidos (Figura 14a, b), promediando a mayor profundidad no ocurre lo mismo, detectándose un nivel de base bastante uniforme en verano, otoño e invierno (Figura 14c, d).

Con teledetección, la profundidad hasta la cual se mide la clorofila depende en gran medida de la atenuación vertical de la luz en los primeros metros de la columna de agua. Como se ha comentado en el apartado anterior, la profundidad de visión del disco de Secchi es un indicador de la transparencia en la capa superficial y varía ampliamente en la estación D2. Por lo tanto, la profundidad de medición de la clorofila con las técnicas de teledetección no se espera que sea similar a lo largo del tiempo. En promedio, se puede asumir que representa los primeros 25 m de la columna de agua en esta zona de estudio (Novoa *et al.*, 2012).

El valor medio de la clorofila SeaWiFS ($0,99 \mu\text{g l}^{-1}$) resulta muy superior al de la clorofila medida *in situ* (que está en torno a $0,60 \mu\text{g l}^{-1}$ tanto en superficie, como en los primeros 50 m) (Tabla 3). Estacionalmente, las diferencias entre ambas técnicas se hacen más notables en la época de máximos, que en la de mínimos.

Aunque la serie de SeaWiFS tiene una longitud menor, también en el periodo coincidente con las medidas *in situ* se observan diferencias respecto a éstas, como puede verse en rango de los datos (Anexo A, Figura 47). Entre 1997-2010, la clorofila SeaWiFS varía entre $0,15$ y $3,56 \mu\text{g l}^{-1}$, la clorofila *in situ* superficial entre $0,00$ y $2,12 \mu\text{g l}^{-1}$ y la clorofila *in situ* promediada hasta 50 m entre $0,14$ y $2,78 \mu\text{g l}^{-1}$.

Por el contrario, cuando la clorofila se estima en esta estación a partir de imágenes MODIS y el algoritmo OC5 (véase siguiente sección de resultados sobre evaluación de la calidad del agua mediante teledetección), las concentraciones son mucho más bajas, con un valor medio \pm desviación estándar de $0,66 \pm 0,46 \mu\text{g l}^{-1}$ ($n=962$), calculados con un periodo de seis años (2005-2010).

En la siguiente sección se explica que las estimas a partir de MODIS y el algoritmo OC5 aunque se asemejan bastante a las medidas *in situ* de superficie (0-1 m), también tienden a dar concentraciones algo más elevadas (Figura 34). Como ya se ha comentado, la profundidad hasta la cual mide el satélite depende de la atenuación vertical de la luz en la capa superficial y podría estar, en promedio, en torno a 25 m (Novoa *et al.*, 2012). Por ello, la clorofila medida con teledetección no es directamente comparable a las series de clorofila *in situ* descritas aquí (que tienen una profundidad de integración fija, hasta 0, 50 y 100 m, respectivamente).

Tampoco hay que descartar el aumento de frecuencia de muestreo que se consigue con el satélite, que incrementa la probabilidad de detectar blooms, pudiendo elevar el valor medio de la serie, especialmente en la época del año más propicia para el crecimiento del fitoplancton (primavera y otoño).

En todo caso, las grandes diferencias encontradas entre la clorofila *in situ* y SeaWiFS en la estación D2 indican que la utilización de estas imágenes en la costa del País Vasco conlleva una fuerte sobreestimación de la clorofila.

Por lo tanto, si el objetivo es obtener valores que representen con fiabilidad la cantidad de biomasa, es más apropiado utilizar otros algoritmos validados en la zona, como el OC5 (véase siguiente sección: Empleo de la teledetección en la evaluación de la calidad del agua). Las imágenes SeaWiFS son utilizadas rutinariamente en estudios regionales y globales, en este sentido su uso tiene la ventaja de permitir la comparación con otros estudios (p. e., Bode *et al.*, 2011) así como, de proporcionar información sobre los ciclos y tendencias temporales del fitoplancton (biomasa y producción) en amplias zonas del océano (Vantrepotte y Melin, 2010).

La variabilidad estacional de la clorofila *in situ* superficial (0-1 m) fue descrita anteriormente en la estación D2 por Revilla *et al.* (2010) con resultados muy similares, observándose un ciclo bimodal con una elevada variabilidad interanual en los valores mensuales.

En la misma estación, Novoa *et al.* (2012) calcularon los valores medios mensuales de clorofila mediante teledetección (MODIS y algoritmo OC5) para el periodo 2005-2010, y también obtuvieron las medias más altas en primavera (marzo $\sim 1,2 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) y otoño (noviembre $\sim 0,7 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$) y las más bajas en verano ($\sim 0,3 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$).

Por lo tanto, el ciclo estacional descrito aquí para la clorofila superficial *in situ* y para la clorofila SeaWiFS (Figura 14a, b) se corresponde muy bien con otros estudios realizados en el País Vasco.

En otras zonas cercanas del Cantábrico, para aguas offshore y litorales donde la influencia de *upwelling* no es muy alta, Bode *et al.* (2011) indican ciclos similares para la clorofila superficial, con el pico principal en primavera, el mínimo en verano y un pico secundario en otoño. La disminución del pico de otoño observada con mayores profundidades de integración (50 ó 100 m) (Figura 14c, d) podría deberse a un efecto de limitación por luz.

4.1.2 TENDENCIAS TEMPORALES EN EL ENTORNO DE LA ESTACIÓN D2 (OFFSHORE)

Contexto océano-climático a gran escala

Gran parte de la variabilidad de la circulación atmosférica en nuestras latitudes puede explicarse mediante índices de teleconexión como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y el Patrón del Atlántico Este (EA) (González *et al.*, 2011a).

El efecto de ambos índices es más importante en los meses de otoño e invierno. La fase positiva de la NAO se asocia a inviernos fríos y secos mientras que la fase positiva del EA se relaciona con clima seco y más cálido, en relación al predominio de la circulación del suroeste (Figura 15).

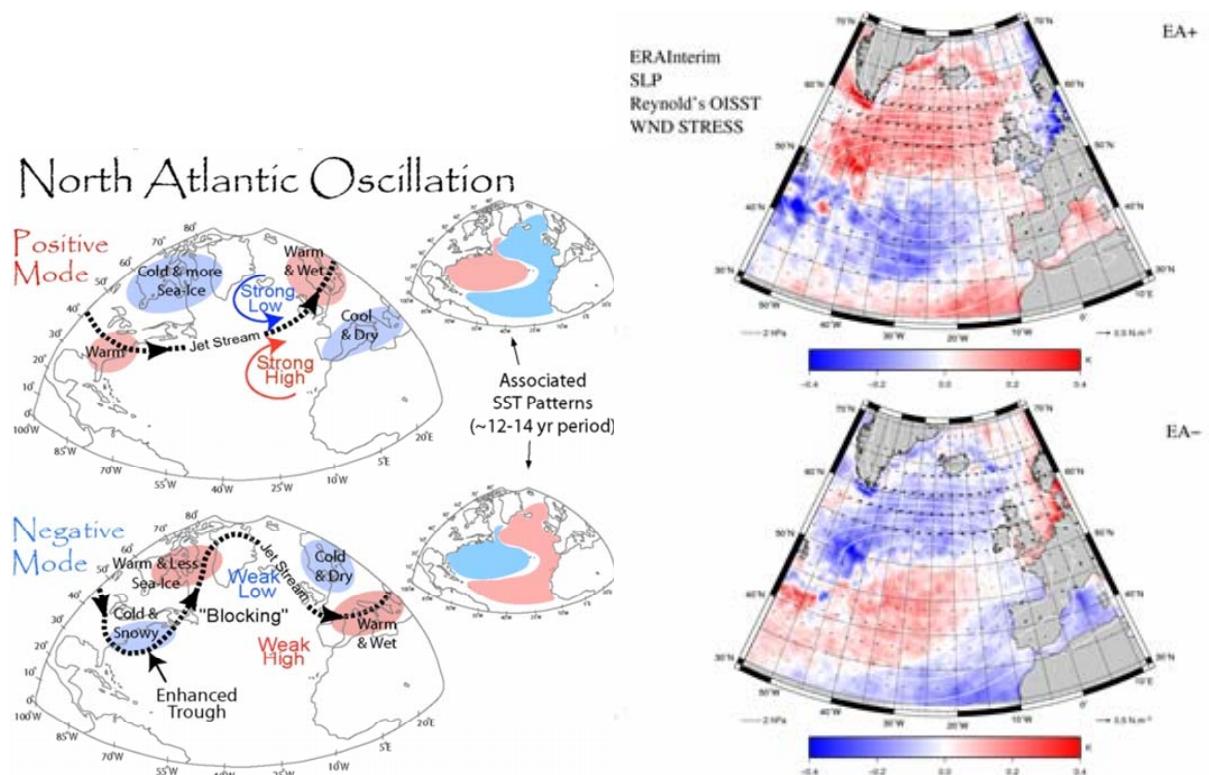


Figura 15. Fases positiva y negativa de los índices NAO (http://airmap.unh.edu/graphics/nao_fig_4.jpg) y EA y condiciones asociadas de presión atmosférica, temperatura superficial del agua de mar y viento.

Recientemente se ha descrito la influencia de los índices de teleconexión en variables como la temperatura, insolación, transporte de humedad, etc. en el sureste del golfo de Vizcaya. Mientras que la NAO es un importante descriptor de la variabilidad atmosférica a escala hemisférica, el EA tiene una influencia importante a escala local en sureste del golfo de Vizcaya. Sin embargo, hay

que considerar que puede darse una sinergia de los efectos derivados de ambos índices, principalmente en fases contrapuestas (Valencia *et al.*, 2009).

En la Figura 16 se muestran las tendencias a largo plazo y cambios abruptos relevantes ocurridos desde 1950 en el índice EA así como en algunas series de variables meteorológicas y oceanográficas representativas del área de estudio.

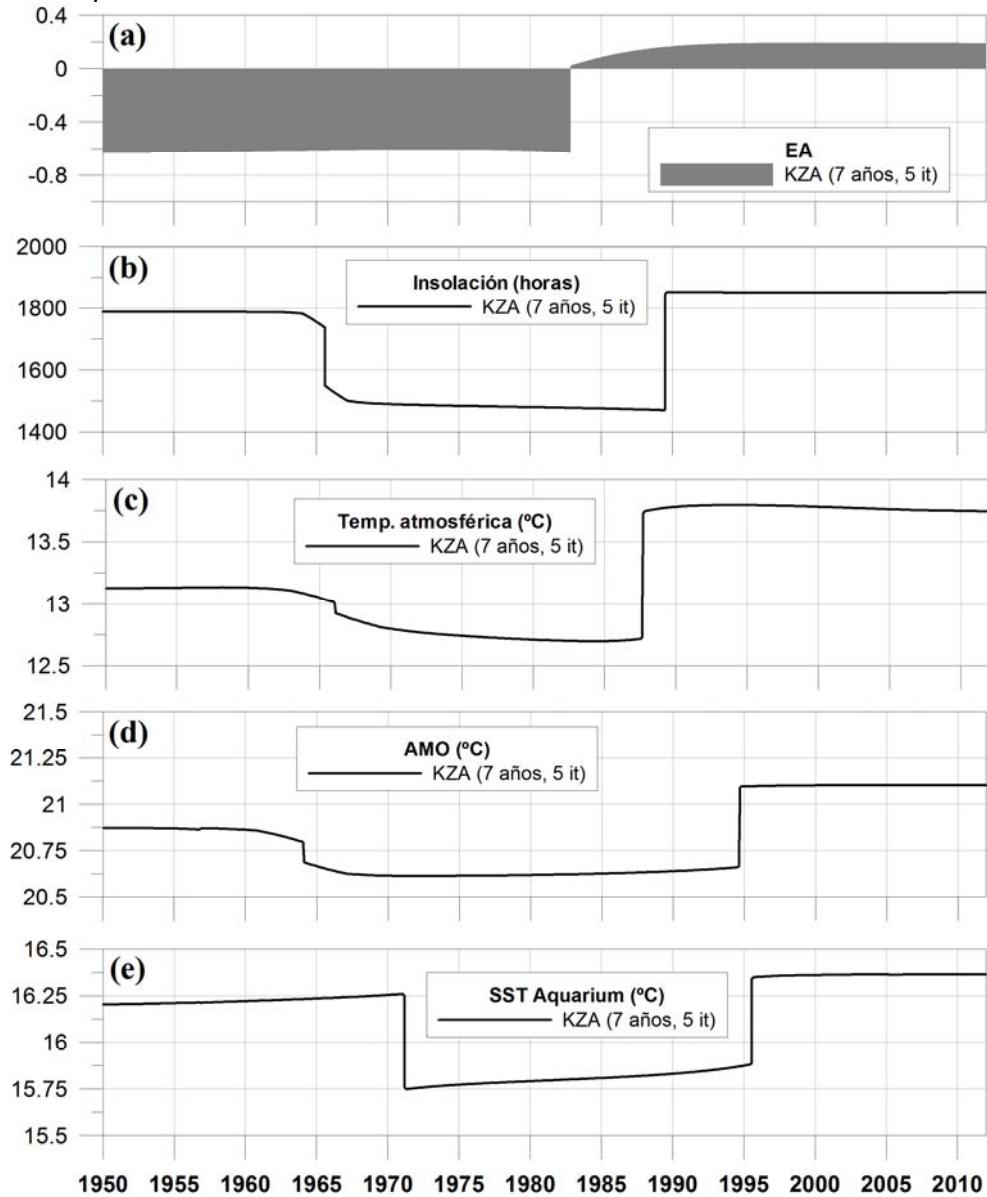


Figura 16. Análisis realizados con el filtro KZA para el estudio de la variabilidad decadal desde 1950 (a) Índice climático EA, (b) Insolación (horas de luz acumuladas por año), (c) Temperatura atmosférica, (d) Temperatura superficial del agua de mar promedio del Atlántico Norte (AMO), (e) Temperatura superficial del agua de mar (SST) en el Aquarium.

El índice climático EA muestra cambios importantes a escala decadal (Figura 16a). Durante tres décadas (años 50, 60 y 70) domina la fase negativa. A comienzos de los 80 se produce un cambio brusco hacia una fase ligeramente positiva, que aumenta progresivamente y alcanza el valor máximo en la década de los 90. Durante la década del 2000 este valor se mantiene, dominando la fase positiva.

La insolación en el Observatorio de Igeldo alterna tres períodos (Figura 16b). Los primeros años se caracterizan por un valor medio aproximado de 5 horas de luz al día ($1800 \text{ h}\cdot\text{año}^{-1}$). En la década de los 60 se observa un descenso importante, que supone una hora de luz menos al día aproximadamente ($1500 \text{ h}\cdot\text{año}^{-1}$). Esta situación se mantiene hasta finales de los 80, cuando la

insolación asciende hasta valores muy similares a los de los años 50. Dicho ascenso tiene lugar aproximadamente cuando el índice EA alcanza su valor máximo.

El patrón de variación de la temperatura atmosférica en el Observatorio de Igeldo (Figura 16c) presenta cierta similitud con el de la insolación, y también parece estar relacionado con el índice climático EA. Así, durante los periodos en los que domina la fase negativa del EA o una fase positiva aún no muy intensa (desde 1950 hasta finales de los 80), se observa una tendencia de descenso de la temperatura atmosférica. La intensificación de la fase positiva del EA coincide con un brusco incremento en la temperatura atmosférica (al igual que se observaba en la insolación). Esto último puede explicarse por el predominio del régimen de vientos del suroeste lo que se asocia a una situación cálida y seca en nuestra zona.

En lo que se refiere a la temperatura superficial del mar, pueden observarse las tendencias en dos series de datos: la serie AMO, que representa las condiciones medias del Atlántico norte (Figura 16d) y la serie del Aquarium, que representa las condiciones del litoral en el sureste del golfo de Vizcaya (Figura 16e).

En ambas series, la década de los 50 es bastante estable, con una temperatura media cercana a 20,8º C en el Atlántico norte y a 16,2º C en el Aquarium. La SST presenta un descenso en los años 60 en la serie del Atlántico norte (~0,2º C), que se observa también posteriormente (a comienzos de los 70) y de forma más brusca en el Aquarium (~0,5º C). Durante los siguientes 25 años, aproximadamente, las temperaturas son relativamente bajas, aunque en la serie del Aquarium se observa un ascenso progresivo (Figura 16e). En torno a 1995, la SST asciende bruscamente en ambas series con un incremento de ~0,5º C, manteniéndose estable durante los años siguientes.

Cabe destacar que, a pesar de que el sureste del golfo de Vizcaya constituye un área geográfica local, las series utilizadas muestran patrones similares a los observados en áreas más amplias. Las tendencias de los años 60-70, se relacionan con cambios a gran escala. Así, el periodo frío de la década de los 70 coincide con el enfriamiento del Atlántico norte asociado a la “Gran Anomalía Salina” (Dickson *et al.*, 1988).

Desde mediados de los 80 se observan incrementos bruscos: primero, en insolación y temperatura atmosférica y después, en temperatura superficial del mar (series AMO y Aquarium). Dichos cambios son concordantes con la intensificación de la fase positiva del índice EA. El periodo de finales de la década de los 80 también se ha descrito en el Atlántico nordeste (Pérez *et al.*, 2000). Esta época se caracterizó por el predominio de viento del suroeste en otoño e invierno lo que dio lugar a temperaturas suaves y pocas precipitaciones. Asimismo propició la entrada de aguas más cálidas y salinas en el golfo de Vizcaya.

Algunos de estos cambios se han descrito también en estudios precedentes sobre variabilidad climática en la costa vasca (Valencia *et al.*, 2003; González *et al.*, 2011a). A continuación se discuten con mayor detalle los cambios observados a partir de mediados de los 80 y su posible influencia sobre la clorofila en el área de estudio.

Influencia climática sobre el fitoplancton

Para el estudio de la influencia de las condiciones climáticas sobre el fitoplancton en la plataforma costera del País Vasco se han utilizado los datos de la estación con menor influencia antrópica y donde los registros de clorofila son más largos (estación D2). Por lo tanto, en este apartado el periodo de estudio considerado es 1986-2011.

Como se comentaba en el apartado anterior, en el contexto de las últimas 6 décadas, a partir de los años 80 ha predominado la fase positiva del índice EA y han ocurrido incrementos importantes en insolación, temperatura atmosférica y temperatura superficial del mar (Figura 16).

En este periodo, las anomalías acumuladas muestran un buen acoplamiento entre el índice EA, la temperatura atmosférica y la evaporación en San Sebastián (Figura 17). Las anomalías acumuladas en el índice EA tienen un punto de inflexión en torno a 1997, aproximadamente, lo que se traduce en un periodo más cálido y seco en el sureste del golfo de Vizcaya.

Para el estudio de anomalías también se han considerado las series de temperatura y salinidad integradas en los primeros 100 m de profundidad de la estación D2, como indicadores del contenido de calor y salinidad en la columna de agua, respectivamente. El mismo régimen de vientos del suroeste que dio lugar a temperaturas cálidas y pocas precipitaciones propició la entrada en el golfo de Vizcaya de agua de tipo subtropical más cálida y salina proveniente del sur (Cabanás *et al.*, 2003; Valencia *et al.*, 2003), tal y como puede verse en la Figura 18.

Aunque con cierto desfase, también se observa un buen acoplamiento entre la salinidad integrada en la columna de agua y el caudal de la Gironde (Figura 18). Esto estaría indicando el efecto de los factores meteorológicos (precipitaciones y aportes fluviales) sobre la salinidad de la columna de agua en la estación D2.

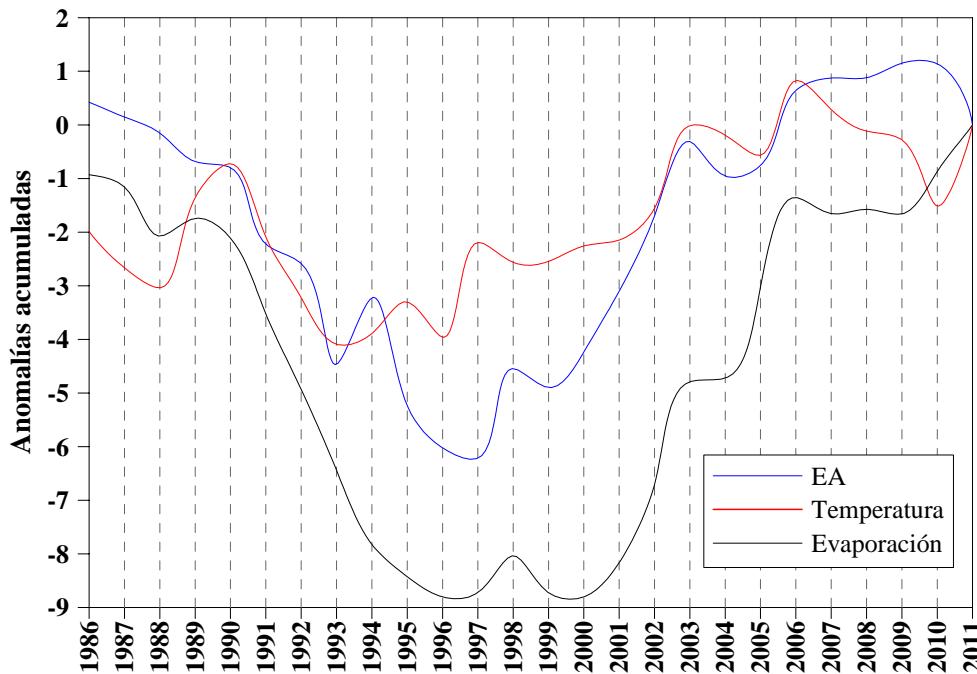


Figura 17. Anomalías acumuladas del índice EA, así como de la temperatura atmosférica y la evaporación medidas en el Observatorio de Igeldo, desde 1986 hasta 2011 inclusive.

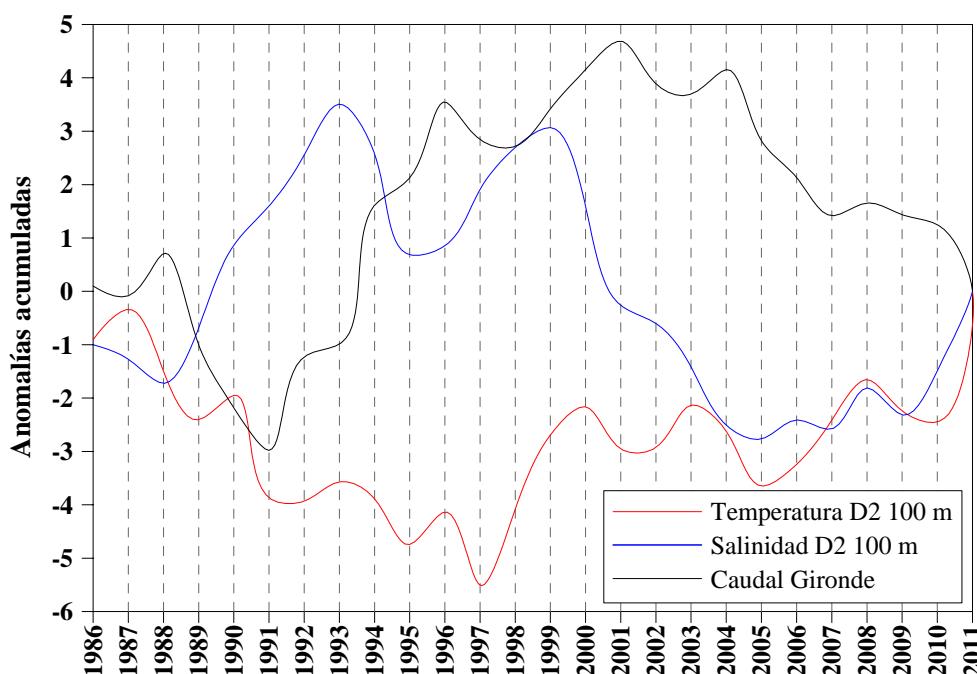


Figura 18. Anomalías acumuladas de la temperatura y salinidad integrada en la columna de agua de la estación D2, así como del caudal de la Gironde, desde 1986 hasta 2011 inclusive.

El filtro KZA para el estudio de la variabilidad a largo plazo muestra resultados muy similares a los obtenidos con los anteriores análisis de anomalías (Figura 19).

Así, en clara asociación con la fase positiva del EA (Figura 19b), la intensificación de la circulación atmosférica del suroeste a finales de los 90 da lugar a temperaturas más cálidas en la superficie y columna del agua (Figura 19d, e). Este efecto se ve favorecido por el predominio de la fase negativa del índice NAO (Figura 19a).

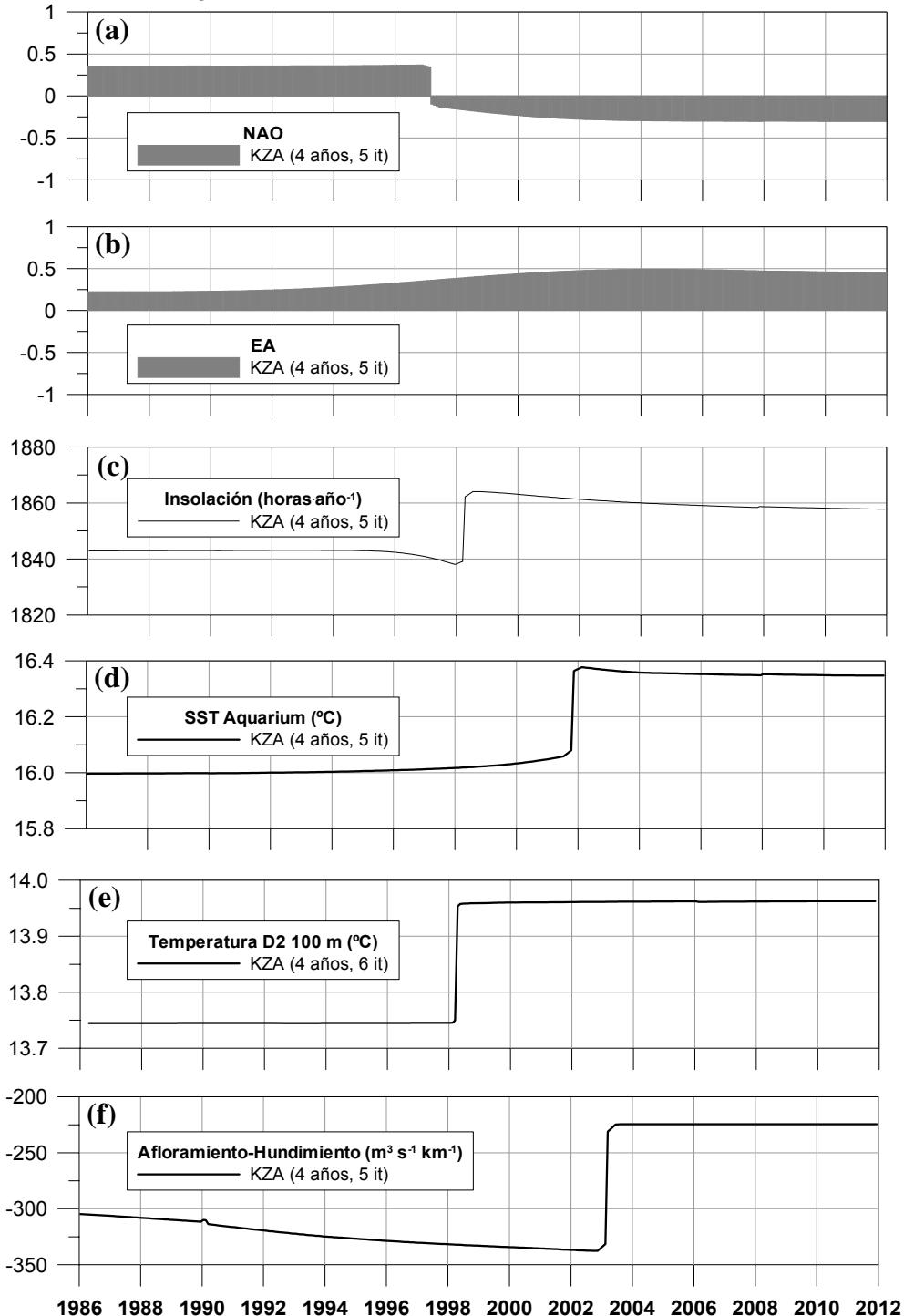


Figura 19. Análisis realizados con el filtro KZA para el estudio de la variabilidad decadal, desde 1986 hasta 2011 inclusive, en (a) Oscilación del Atlántico Norte (NAO); (b) Patrón del Atlántico Este (EA); (c) Insolación (horas de luz acumuladas); (d) Temperatura superficial del agua del mar (SST) en el Aquarium; (e) Temperatura integrada en la columna de agua en la estación D2; (f) Balance afloramiento-hundimiento.

La insolación presenta poca variación, estando cercana a 1850 horas acumuladas al año, unas 5 horas de sol por día (Figura 19c). Por otra parte, en 1998 se aprecia un incremento que concuerda en el tiempo con el que se produce en la temperatura del agua (Figura 19d, e), coincidiendo también con la tendencia hacia inviernos más cálidos que indican los índices climáticos (Figura 19a, b). No obstante, el incremento de la insolación a finales de los 90 es muy leve y posiblemente no tenga influencia sobre el fitoplancton ya que supone sólo unas 20 horas acumuladas al año.

En el anterior apartado sobre el ciclo estacional se comentó que los valores medios de insolación eran más altos durante un periodo reciente de 25 años, que en los últimos 60 años. Dicha diferencia suponía unos 0,4 días más de insolación promedio al mes en el último periodo (1986-2010) respecto a la serie completa (Tabla 3).

Asimismo, en el análisis de la variabilidad decadal desde los años 50, con el filtro KZA se observaba un aumento considerable de la insolación a finales de los años 80 (Figura 16b) que suponía aproximadamente una hora más de sol al día respecto a las dos décadas anteriores (en torno a 360 horas acumuladas al año).

Por lo tanto, todo parece indicar que en el contexto de los últimos 60 años la insolación ha sido relativamente alta durante el periodo de estudio en que disponemos de datos de clorofila (1986-2011). Sin embargo, cuando se aplica el filtro KZA a la serie de insolación acotada entre 1986 y 2011 no se observa el aumento brusco de finales de los 80 (Figura 19c). Esto es debido a que el cambio se produce justo al comienzo de la serie y el filtro, al estar basado en una media móvil con una ventana decadal no puede detectarlo, homogenizando los valores con los de los años posteriores.

En cuanto al balance afloramiento-hundimiento, como puede observarse en la Figura 19f, a lo largo de este periodo dominan los valores negativos, lo cual es coherente con la fase positiva del EA (Figura 19b). Hay que recordar que el balance afloramiento-hundimiento se calcula con datos de intensidad y dirección del viento y las componentes del oeste favorecen el hundimiento en la costa vasca, debido a la orientación geográfica de ésta, mientras que los vientos del nordeste producen afloramiento (Fontán *et al.*, 2008).

Una serie temporal más larga para el balance afloramiento-hundimiento (1958-2001) puede consultarse en Valencia *et al.* (2004). En dicha serie se observan los valores más altos durante los años 60 y hasta mediados de los 70, con un balance anual medio en torno a $-200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, que ocasionalmente llega a alcanzar valores positivos. Por el contrario, entre 1977 y 2001, el hundimiento se hace más importante y los balances anuales se establecen alrededor de $-400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ (Valencia *et al.*, 2004). La serie estudiada en el presente informe (1986-2011) muestra que el valor medio ha aumentado ligeramente en años recientes, aproximadamente a partir de 2004 (Figura 19f).

El KZA muestra una leve relajación del hundimiento a partir de 2004, que coincide con los años en los que la NAO presenta los valores más negativos (Figura 19a, f). Valencia *et al.* (2004) también encuentran una relación similar con la NAO, cuando indican que valores más negativos en este índice climático coinciden con valores más altos en el balance afloramiento-hundimiento.

La costa vasca, situada en el extremo oriental del Cantábrico se encuentra alejada del sistema de afloramiento que afecta a la costa atlántica gallega y a la costa occidental cantábrica. En dichas zonas, la intensidad y frecuencia del afloramiento afecta considerablemente al fitoplancton al aportar una cantidad importante de nutrientes desde las capas profundas del mar hasta las superficiales. Por el contrario, el afloramiento en la costa vasca no tiene tanta relevancia en el sentido de aporte de nutrientes (Revilla *et al.*, 2009). No obstante, el balance afloramiento-hundimiento puede relacionarse con la turbulencia (Valencia *et al.*, 2004; Fontán *et al.*, 2008), lo cual influye en el grado de mezcla de la columna de agua y, por tanto, podría afectar al fitoplancton.

En la serie analizada se diferencian dos épocas (Figura 19f). Entre los años 1986 y 2003 el balance afloramiento-hundimiento se sitúa en torno a $-325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Este valor es cercano a los referidos por Valencia *et al.* (2004) para el periodo 1977-2001, que se pueden considerar

representativos de procesos intensos de turbulencia y mezcla en la columna de agua. En torno al año 2003, se observa un aumento en el balance (hasta $-225 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, aproximadamente), dando lugar a una etapa de menor hundimiento que se mantiene sin cambios hasta la actualidad (Figura 19f).

Fontán *et al.* (2008) también describen anomalías en el balance afloramiento-hundimiento estudiando el periodo 2001-2005 en el contexto de las últimas dos décadas. Estos autores refieren eventos de hundimiento intenso en los años 2001 y 2002 (que habrían dado lugar a una fuerte mezcla de la columna de agua); posteriormente, condiciones medias en 2003 y, por último, condiciones anómalas en 2004 y 2005 debidas a frecuentes eventos de afloramiento.

El predominio del hundimiento en la costa vasca que tiene lugar desde 1977 (aunque con cierta relajación a partir de 2004) es interesante, ya que un estudio preliminar sugiere que han podido suceder cambios en la posición vertical y en la magnitud del máximo de clorofila (Figura 20).

Hay que señalar que hacen falta más estudios para confirmarlo, dado que por ahora se han utilizado únicamente datos del máximo obtenidos de forma automática y que podrían contener cierto ruido (véase Anexo A, Figura 48).

La Figura 20a muestra que podría haber ocurrido una profundización de los valores máximos de la clorofila entre los años 2001 y 2003, pasando de unos 25 a unos 30 m. Posteriormente, hacia el año 2004, la magnitud de los valores máximos parece haberse incrementado ligeramente, en un 15-20% (Figura 20b).

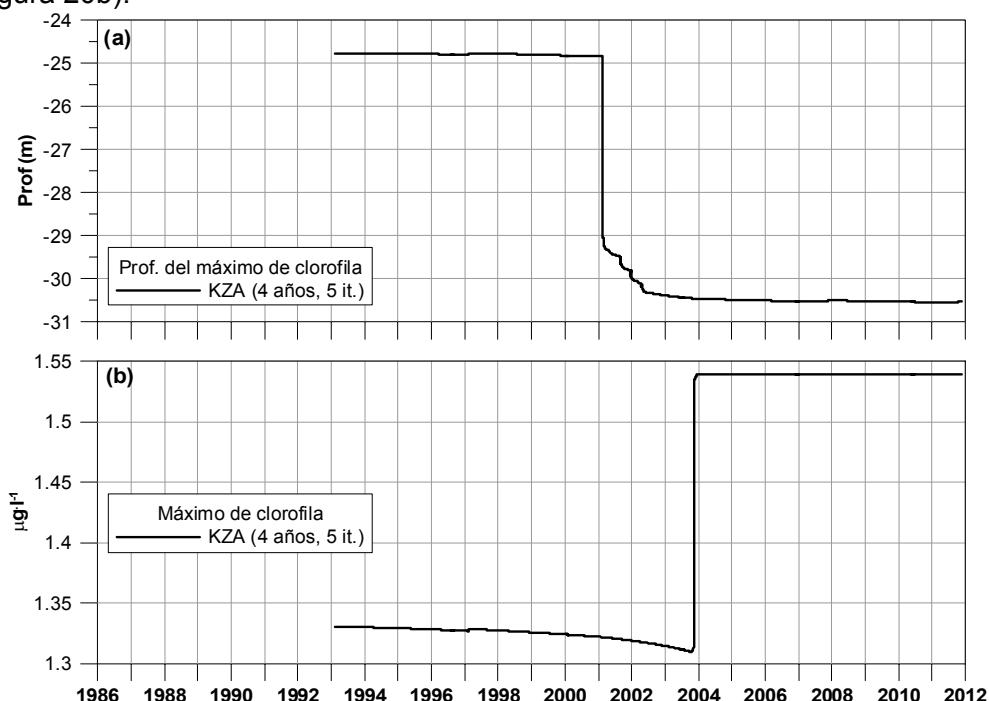


Figura 20. Análisis preliminar realizado con el filtro KZA para el valor máximo de la clorofila-a a lo largo de la columna de agua en la estación D2. (a) Localización y (b) Valor del máximo. Los datos entre 1986-1992 no se han utilizado ya que el muestreo se realizaba en un número mucho más limitado de profundidades (la serie de datos completa desde 1986 puede consultarse en el Anexo A).

A continuación se presenta el estudio de las tendencias en algunas variables que podrían ser indicadoras del aporte natural de nutrientes a la plataforma costera.

En la Figura 21a se muestra el análisis con el filtro KZA del balance entre precipitación y evaporación medido en el Observatorio de Igeldo (AEMET). El balance presenta una leve tendencia de aumento a lo largo de toda la serie, que está interrumpida por una brusca disminución que se produce entre finales de los 90 y comienzos del 2000.

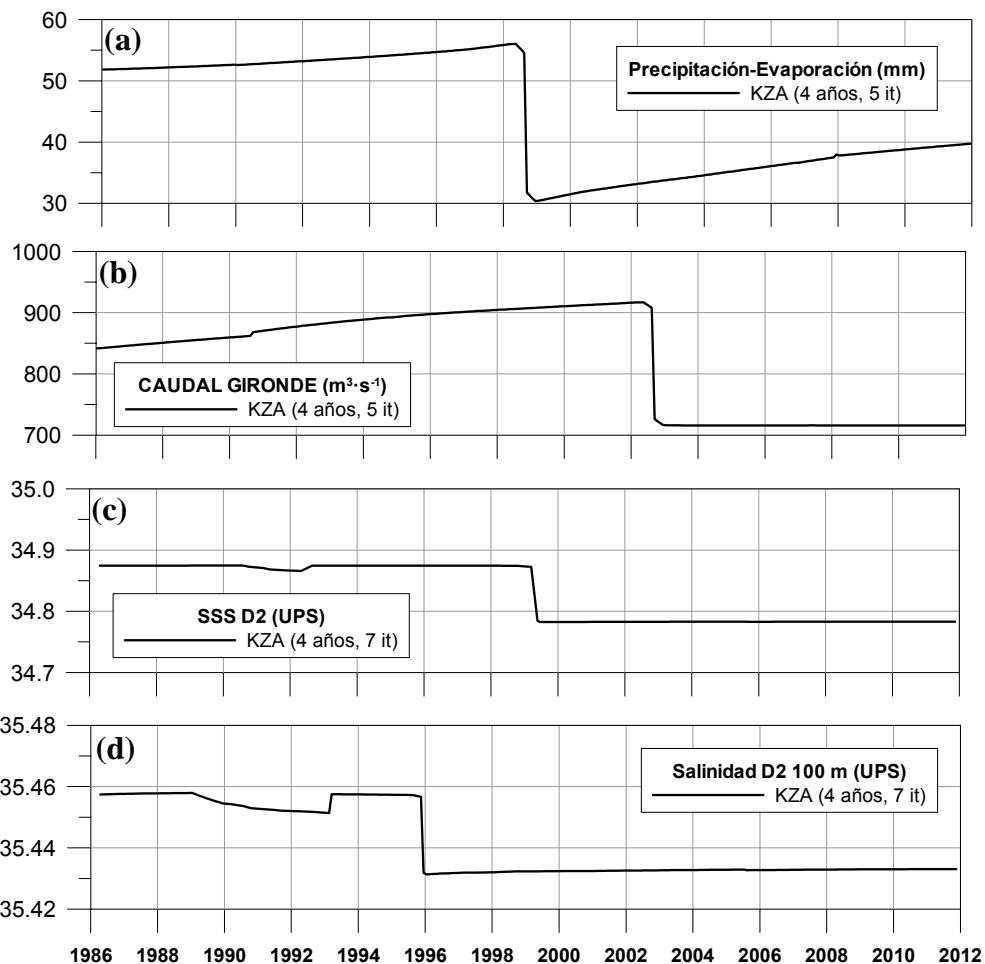


Figura 21. Análisis realizados con el filtro KZA para el estudio de la variabilidad decadal desde 1986 hasta 2011 inclusive. (a) Balance precipitación-evaporación en Igeldo, (b) Caudal de la Gironde, (c) Salinidad superficial en la estación D2, (d) Salinidad de la columna de agua en la estación D2.

Hay que recordar que los índices climáticos globales y también otras variables ocáneometeorológicas presentaban cambios relevantes durante los mismos años. A finales de los 90 se observaba un calentamiento importante en la atmósfera y en el mar (Figura 17, Figura 18, Figura 19d, e) y la evaporación aumentaba (Figura 17). Entre los años 1997 y 2003, el EA alcanzaba el valor máximo (Figura 17; Figura 19b) y la NAO el valor más negativo (Figura 19a). Las fases contrapuestas de estos índices ya se ha comentado que producen un efecto sinérgico, que se manifiesta en este caso como un fuerte calentamiento, lo que puede haber hecho que aumente la evaporación y disminuya el balance precipitación-evaporación.

La variabilidad decadal del caudal de la Gironde en los últimos 26 años se muestra en la Figura 21b. Esta cuenca se localiza no muy lejos del área de estudio y por su tamaño es adecuada para estudiar la influencia climática sobre los aportes fluviales. El caudal presenta una tendencia levemente ascendente hasta el año 2003, momento en el que desciende bruscamente para estabilizarse en un nivel más bajo durante los siguientes años. Dicho descenso, podría responder (con cierto desfase) al brusco descenso del balance precipitación-evaporación en 1998 (Figura 21a). Por tanto, el aporte de nutrientes en el sureste del golfo de Vizcaya podría haber sido cada vez mayor a lo largo de la década de los 90 y comienzos del 2000, para descender en los últimos 10 años.

La salinidad en la estación D2 presenta un descenso en la segunda mitad de los 90, que es más notable en los valores de superficie, unos 0,1 UPS (Figura 21c), que en el promedio de la columna de agua, aproximadamente 0,02 UPS (Figura 21d). El descenso de la salinidad parece estar ligado a la tendencia ascendente del caudal fluvial durante los años precedentes (Figura 21b).

Esta relación ya se ha señalado anteriormente en el análisis de anomalías (Figura 18). No obstante, la salinidad es una variable compleja que responde no sólo al aporte de agua dulce continental, sino también al transporte de masas de agua. En el análisis de anomalías también se indicaba que a finales de los 90 el régimen de vientos del suroeste propició la entrada en el golfo de Vizcaya de agua de tipo subtropical más salina.

Por último, se comentan los resultados del análisis de la variabilidad decadal de la clorofila-a en la estación D2, obtenidos con el filtro KZA.

La clorofila estimada con satélite (SeaWiFS) presenta una tendencia de leve descenso durante el periodo en el que hay datos, que abarca mayoritariamente la década del 2000 (Figura 22a). El máximo descenso que se observa en la clorofila satélite es de unos $0,05 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

La clorofila *in situ* de superficie (Figura 22b) presenta un descenso de mayor magnitud ($\sim 0,20 \mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), que tiene lugar en torno a 1996. En la clorofila promediada hasta 50 m y hasta 100m se observa un cambio opuesto, aumentando ambas en el año 2000 en un 40-50% de su valor inicial (Figura 22c, d).

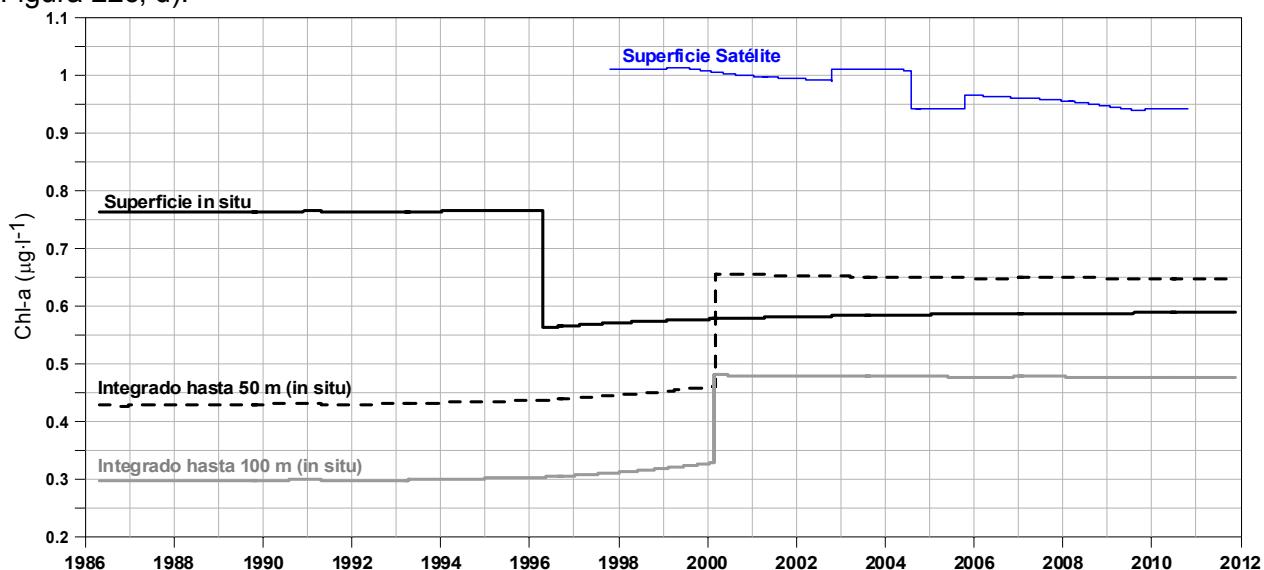


Figura 22. Estación D2, variabilidad decadal de la concentración de clorofila satélite (desde 1997) e *in situ* (desde 1986). Se muestra el resultado del filtro KZA (5 años y 4 iteraciones).

Los cambios observados en la clorofila *in situ* (tanto superficial, como integrada en profundidad) tienen lugar en el mismo periodo en el que se producen cambios importantes en los índices EA y NAO, así como en variables oceanográficas, como la temperatura del mar y la salinidad. Las tendencias opuestas observadas en la clorofila *in situ* de superficie y en la promediada hasta 50 m indican la existencia de distintos factores de control para el fitoplancton a diferentes profundidades de la columna de agua.

Las condiciones más cálidas a partir de 1997 podrían ser la causa principal de la disminución de la concentración de clorofila-a en la capa superficial (0-1 m). Esto se explicaría por una mayor estratificación térmica de la columna de agua en la época estival, lo que conllevaría una mayor limitación por nutrientes en la capa superior.

Por otra parte, el aporte fluvial de nutrientes cada vez más alto en la década de los 90 y las buenas condiciones de insolación que tienen lugar desde finales de los 80 podrían haber fomentado la producción fitoplánctonica a mayores profundidades en la columna de agua, lo que explicaría el aumento que se observa en la clorofila-a promediada en un rango de profundidad amplio (hasta 50 y 100 m). Hay que señalar que con otro método de análisis (anomalías anuales) se ha observado una tendencia de aumento estadísticamente significativa ($p<0,05$) para la serie de clorofila-a *in situ* de la D2 promediada hasta 50 m (Morán *et al.*, 2012) (véase Figura 23).

Aunque la información sobre los máximos verticales de clorofila-a es aún preliminar, la magnitud de los picos y la profundidad que ocupan en la columna de agua parecen haber aumentado en la década del 2000. En este sentido, aunque el hundimiento muestra cierta relajación a partir de 2004, a lo largo de todo el periodo predominan los procesos de hundimiento frente a los afloramiento, lo cual podría haber favorecido la profundización de los picos de biomasa en la columna de agua.

Los cambios que se aprecian en la clorofila satélite son de pequeña magnitud, muy cercanos a la precisión de las medidas ($\pm 0,02 \mu\text{g L}^{-1}$, aproximadamente). Novoa *et al.* (2012) también analizaron la tendencia temporal de la clorofila-a en la estación D2, con dos series de datos: *in situ* (0-1 m) y satelital (MODIS y algoritmo OC5). Dichas series correspondían a un periodo mucho más corto (2005-2010) y por ello, los resultados no son comparables con los del presente análisis. No obstante, aplicando un método estadístico distinto al empleado aquí, estos investigadores también observaron tendencias contradictorias entre los dos tipos de medidas (tendencia negativa con datos *in situ* y tendencia positiva con datos de satélite). Estos resultados pueden consultarse en la siguiente sección del informe (4.2.5 Estudio de la influencia de las descargas de ríos en la calidad de las aguas costeras colindantes, Tabla 8).

Esto sugiere que los resultados de los análisis de tendencias temporales que utilizan datos de clorofila procedentes de teledetección no tienen porqué concordar siempre con los que utilizan datos de clorofila medida *in situ*. Esto puede ser, en parte, debido a las diferentes profundidades de medida asociadas a cada técnica (variable en función de la transparencia del agua en el caso de la teledetección y fija a lo largo del tiempo en el caso de las medidas *in situ*).

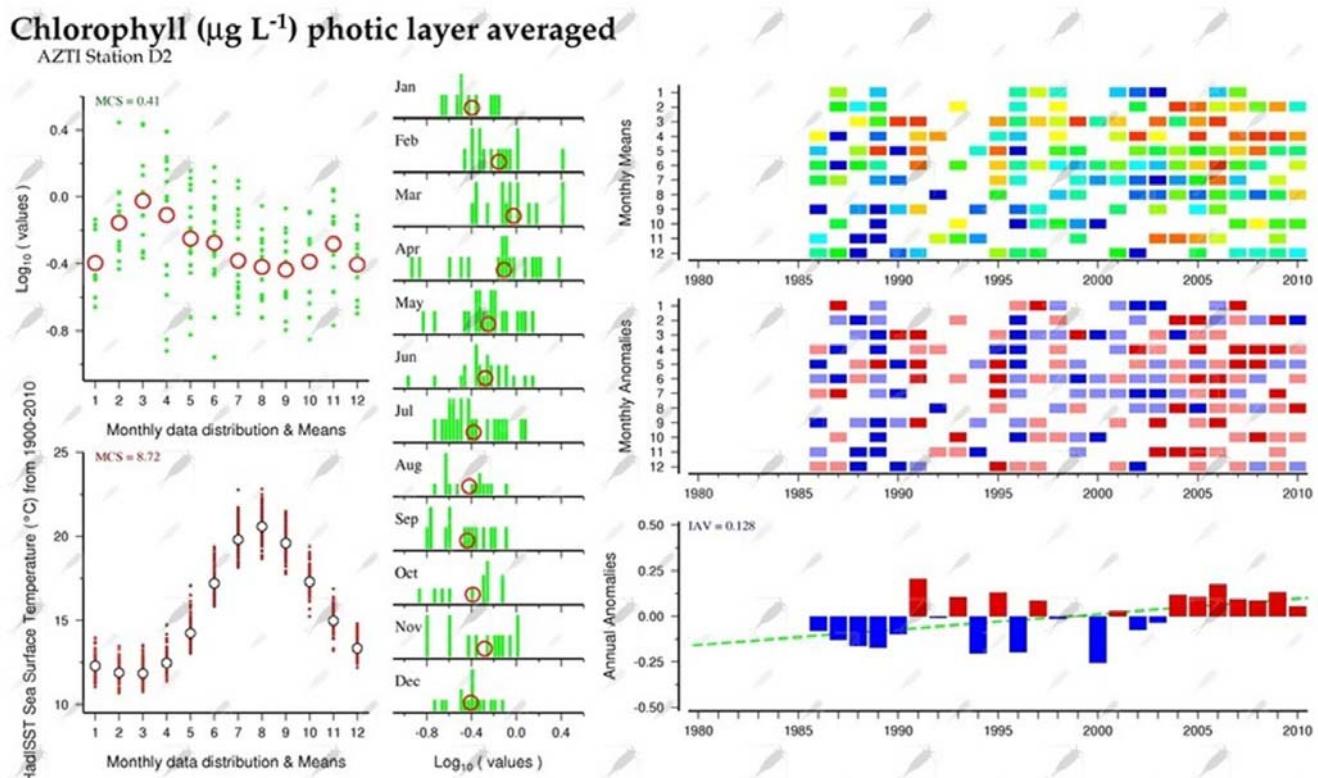


Figura 23. Análisis de la serie temporal de clorofila-a promediada hasta 50 m en la estación D2, realizado para el ICES Working Group on Phytoplankton & Microbial Ecology. El panel inferior derecho representa las anomalías anuales y la línea verde discontinua es el ajuste de la regresión lineal con el tiempo (años). La tendencia de aumento es estadísticamente significativa ($p<0,05$). Tomado de: http://www.st.nmfs.noaa.gov/nauplius/media/time-series/site_iberian-azti-bay-of-biscay-phy/html/zoom-superbox.html.

4.1.3 DIFERENCIAS A LO LARGO DE UN RADIAL COSTA-OCÉANO

Temperatura, salinidad y clorofila

En las estaciones D1 y D0, mucho más cercanas al litoral que la D2 (véase su localización en la Figura 2) los muestreos comenzaron a realizarse en el año 2000, con lo cual el periodo de estudio es más limitado para las variables medidas *in situ* en estas estaciones, con sólo 12 años frente a los 26 años de la estación D2.

Considerando únicamente el periodo común a las tres estaciones del radial (2000-2011), la temperatura superficial del mar (SST) en la estación D2 presenta un valor promedio \pm desviación estándar de $17,1 \pm 4,1^\circ\text{C}$ ($n=99$), igual al de la estación D1 ($n=90$) y ligeramente superior al de la estación D0 ($17,0 \pm 4,0^\circ\text{C}$, $n=104$).

El ciclo estacional de la SST es muy similar entre las tres estaciones del radial, como puede observarse comparando la Figura 8a (anteriores apartados) con la Figura 24.

La salinidad superficial media del periodo 2000-2011 es la similar en las tres estaciones del radial (34,7 UPS) e indica un 2% de agua dulce en la columna de agua. La desviación estándar es algo mayor en la zona offshore ($\pm 0,8$ UPS en la D2, $n=99$), comparada con el litoral ($\pm 0,7$ UPS en la D1, $n=90$, y en la D0, $n=104$). Esto puede ser debido a la influencia de las descargas del Adour en la zona offshore. Como puede verse en la serie de datos de salinidad superficial, los valores mínimos llegan a ser más bajos en la D2 (Figura 54b), en comparación con las estaciones más cercanas al litoral del Oiartzun (Figura 56b y Figura 57b).

El ciclo estacional de la salinidad superficial se presenta en la Figura 25 para las estaciones D1 y D0, y puede consultarse en la Figura 11a para la estación D2.

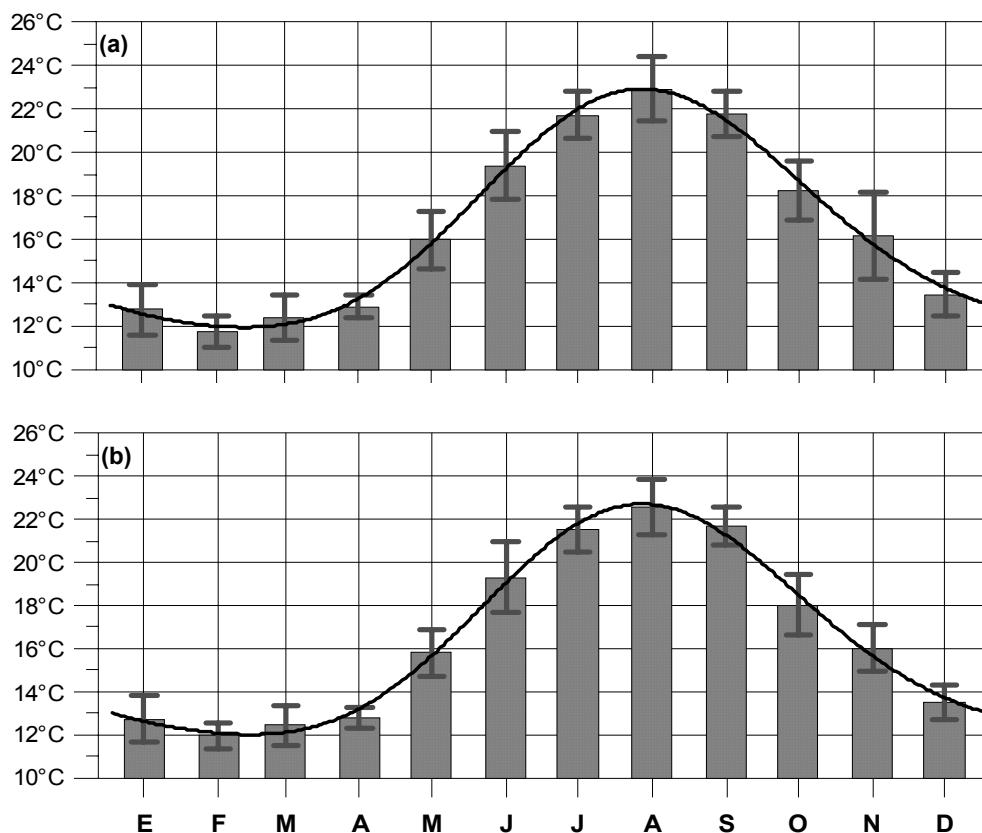


Figura 24. Variabilidad intranual de la SST en el periodo [2000-2011]: (a) Estación D1, (b) Estación D0. Se muestra la media mensual \pm desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

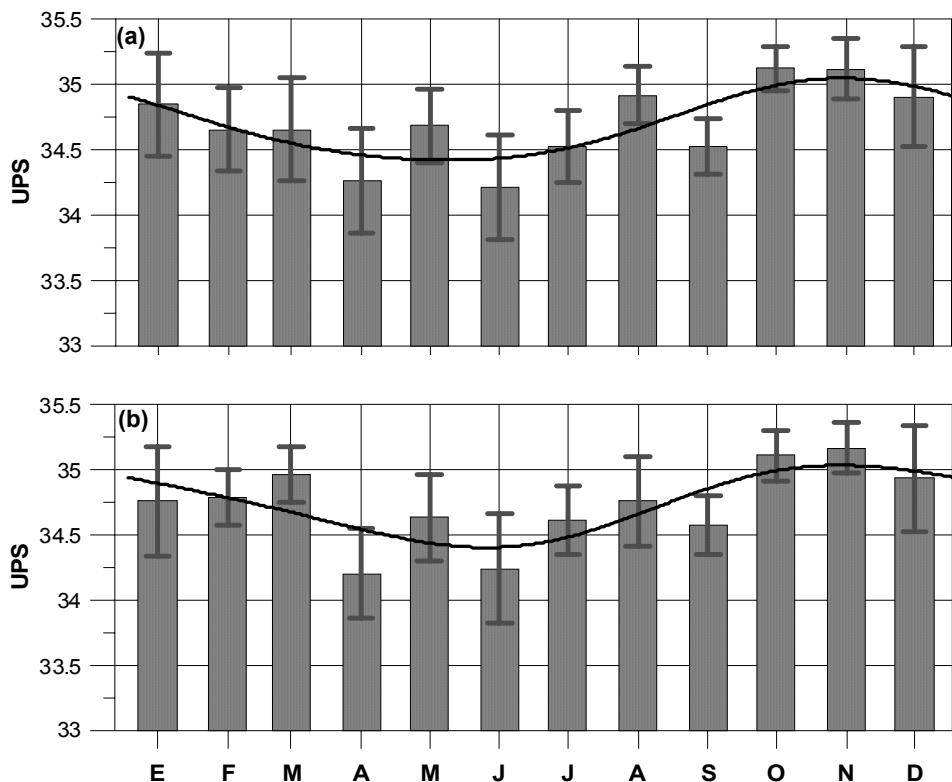


Figura 25. Variabilidad intransal de la salinidad superficial en el periodo [2000-2011]: (a) Estación D1, (b) Estación D0. Se muestra la media mensual $\pm \frac{1}{2}$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

Similar a lo ya comentado respecto a la estación D2, la salinidad en el litoral es en promedio más alta entre octubre-y enero, después desciende ligeramente para mostrar los valores mínimos en primavera, y partir de julio comienza de nuevo a ascender. No obstante, la variabilidad interanual de la salinidad es notable, lo que resulta en una elevada desviación típica para cada mes.

El ajuste estadístico del ciclo estacional de las variables medidas en el entorno de la estación offshore (D2) puede verse resumido en anteriores apartados (Tabla 3). A continuación se muestra de forma resumida el ajuste estacional de las series obtenidas en la estación D1 (Tabla 4) y en la estación D0 (Tabla 5).

Tabla 4. Ajuste de las series de datos de la estación D1 al ciclo estacional. Se muestran los coeficientes de la combinación lineal del ajuste estadístico, el RMSE (*Root Mean Square Error*) entre los valores medios mensuales y la función de ajuste, y el coeficiente de correlación de Spearman (r^2).

	Media	Anual	Semianual	RMSE	r^2
Temp. Superficial Mar (°C) D1 (2000-2011)	16,65	5,44	0,85	0,29	0,97
Salinidad superficial (UPS) D1 (2000-2011)	34,70	0,31	0,03	0,17	0,48
Clorofila SeaWiFS (µg.l-1) D1 (1997-2010)	1,05	0,41	0,10	0,36	0,55
Clorofila superficial (µg.l-1) D1 (2000-2011)	0,72	0,18	0,12	0,19	0,40
Clorofila hasta 50 m (µg.l-1) D1 (2000-2011)	0,60	0,10	0,15	0,10	0,55

Tabla 5. Ajuste de las series de datos de la estación D0 al ciclo estacional. Se muestran los coeficientes de la combinación lineal del ajuste estadístico, el RMSE (*Root Mean Square Error*) entre los valores medios mensuales y la función de ajuste, y el coeficiente de correlación de Spearman (r^2).

	Media	Anual	Semianual	RMSE	r^2
Temp. Superficial Mar (°C) D0 (2000-2011)	16,56	5,29	0,89	0,30	0,97
Salinidad superficial (UPS) D0 (2000-2011)	34,73	0,31	0,04	0,19	0,58
Clorofila superficial (µg.l-1) D0 (2000-2011)	0,72	0,07	0,06	0,15	0,32
Clorofila hasta 30 m (µg.l-1) D0 (2000-2011)	0,76	0,07	0,14	0,07	0,83

En cuanto a la concentración de clorofila-a, en las estaciones D0 y D1 se ha realizado el análisis de su ciclo estacional con las series de datos más largas disponibles: 1997-2010 para clorofila SeaWiFS (sólo estación D1) y 2000-2011 para clorofila *in situ*.

En la estación litoral D1 el modelo de ajuste estacional explica entre el 40 y 55% de la variabilidad de los datos (Tabla 4), bastante menos que en la D2, donde explicaba entre el 59 y 85% (Tabla 3).

Para la clorofila satélite (SeaWiFS), la estación D1 presenta un valor medio similar al de estación D2 ($\sim 1 \mu\text{g l}^{-1}$). Sin embargo, en la estación D1 el valor medio del mes de diciembre (Figura 26a) es bastante más elevado que en la D2 (Figura 14a).

La clorofila *in situ* superficial y promediada hasta 50 m (Figura 26b, c) presenta el pico de invierno-primavera en febrero, con un repunte posterior en abril. La D2 presenta un pico de magnitud similar, pero éste tiene lugar en marzo (Figura 14b, c).

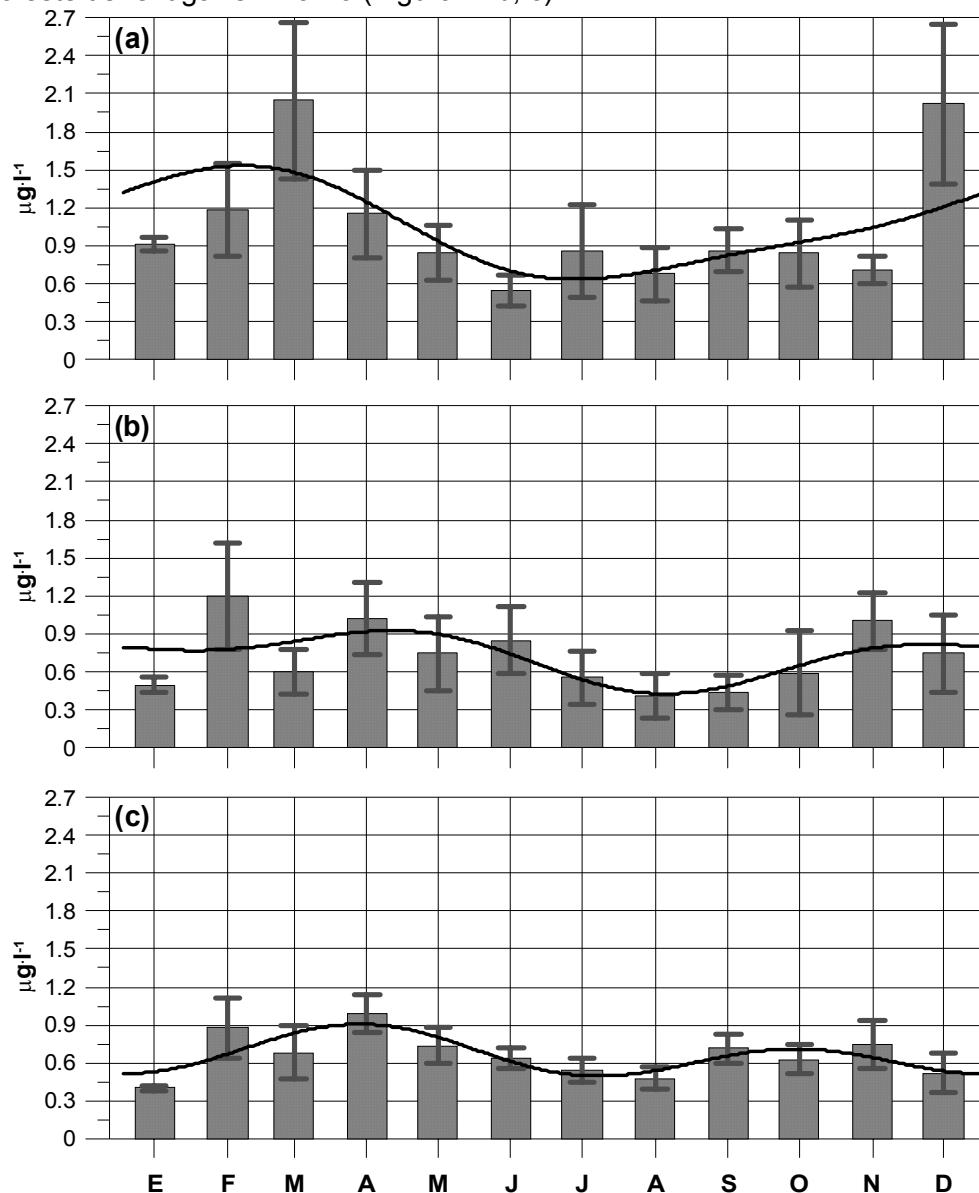


Figura 26. Estación D1, variabilidad anual de la concentración de clorofila satélite (1997-2010) e *in situ* (2000-2011). (a) SeaWiFS, (b) *in situ* superficial, (c) *in situ* promediada hasta 50 m. Se muestra la media mensual $\pm 1/2$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

En cuanto a la estación D0, el ciclo estacional explica un porcentaje muy bajo de la variabilidad de la clorofila *in situ* superficial (32%) (Tabla 5). Su valor medio anual ($0.72 \mu\text{g l}^{-1}$) es similar al de la estación D1 (Tabla 4).

La clorofila superficial (0-1 m) en la estación D0 presenta el máximo en febrero (Figura 27a), siendo de magnitud muy similar al de la estación D1 (Figura 26b) y al de marzo en la estación D2 (Figura 14b).

Por el contrario, el mínimo estival para la clorofila superficial está poco definido en la estación D0. De hecho, el descenso que tiene lugar en esta variable en verano es muy leve en la estación D0 (Figura 27a), pero se intensifica en la D1 (Figura 26b) y aún más en la D2 (Figura 14b). Esto sugiere que existe una menor limitación por nutrientes a medida que nos acercamos al litoral del Oiartzun.

En la columna de agua, el ajuste al ciclo estacional es alto, ya que explica hasta el 83% de la variabilidad de los datos (Tabla 5). El ciclo es bimodal con valores relativamente más altos entre febrero y junio, y entre septiembre y noviembre.

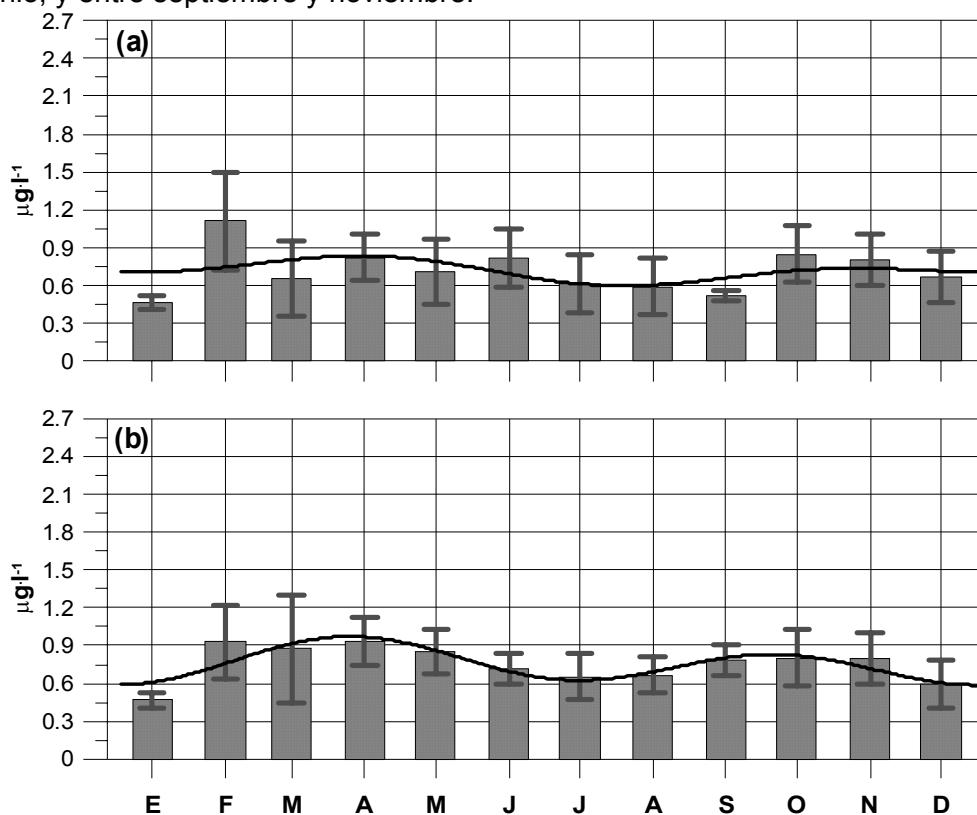


Figura 27. Estación D0, variabilidad anual de la concentración de clorofila (2000-2011). (a) *in situ* superficial, (b) *in situ* promediada hasta 30 m. Se muestra la media mensual $\pm 1/2$ desviación estándar, así como el ajuste estadístico.

También se ha realizado un análisis de la variabilidad decadal de la clorofila-a en las estaciones D1 y D0, aunque los resultados deben tomarse con precaución ya que la longitud de las series no es aún muy larga (12-13 años).

Los resultados de la estación D1 se muestran en la Figura 28. La clorofila satélite (SeaWiFS) es en promedio bastante superior a clorofila *in situ*, al igual que se observaba en la estación D2 (Figura 22). Como ya se ha señalado anteriormente este método basado en imágenes de satélite tiende a sobreestimar bastante las concentraciones ya que no está validado específicamente para la zona de estudio.

La clorofila satélite (SeaWiFS) presenta una leve tendencia de descenso para los casi 13 años de datos, en un periodo que es bastante coincidente con el de las medidas *in situ*. No obstante, el máximo descenso que se observa en la clorofila satélite es de $\sim 0.05 \mu\text{g l}^{-1}$, muy cercano al límite de detección, al igual que se observaba en el pixel representativo de la estación D2 (Figura 22).

En el caso de la clorofila *in situ*, en la estación D1 los valores de superficie son ligeramente mayores que los integrados en los primeros 50 m (profundidad media de la capa fótica) (Figura

28). No se aprecian tendencias ni cambios bruscos en el valor medio de la clorofila *in situ* durante el periodo 2000-2011, al igual que se observaba en la estación D2 (Figura 22).

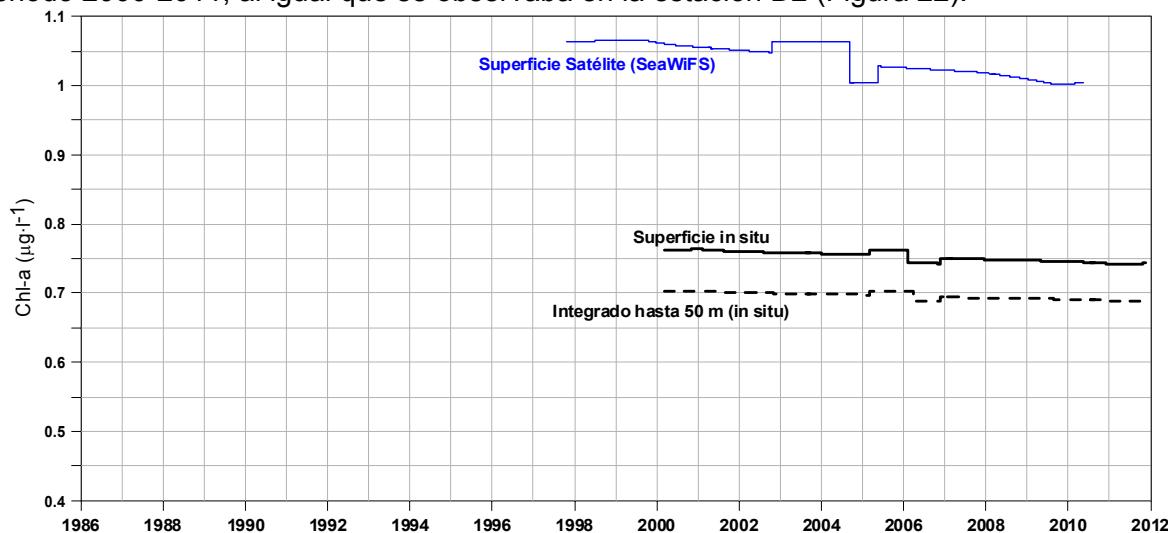


Figura 28. Estación D1, variabilidad decadal de la concentración de clorofila satélite (1997-2010) e *in situ* (2000-2011). Se muestra el resultado del filtro KZA (5 años y 4 iteraciones).

En la Figura 29 se pueden ver los resultados del filtro KZA aplicado a la clorofila *in situ* de la estación D0. En superficie (0-1 m) el valor medio es muy similar al de la estación D1 (~0,75 µg·l⁻¹).

En la estación D0, la clorofila promediada en la columna de agua supera ligeramente a la medida en superficie, al contrario de lo que se observaba en la estación D1. El diferente patrón de variación vertical de la clorofila que presentan las estaciones litorales del radial frente al Oiartzun podría indicar una mayor importancia de la luz como factor limitante del fitoplancton para la estación D1. La profundidad en la estación D0 es mucho menor y la capa fótica ocupa en la mayoría de las ocasiones toda la columna de agua, lo que contribuirá a no limitar la producción primaria cuando se den procesos de mezcla vertical.

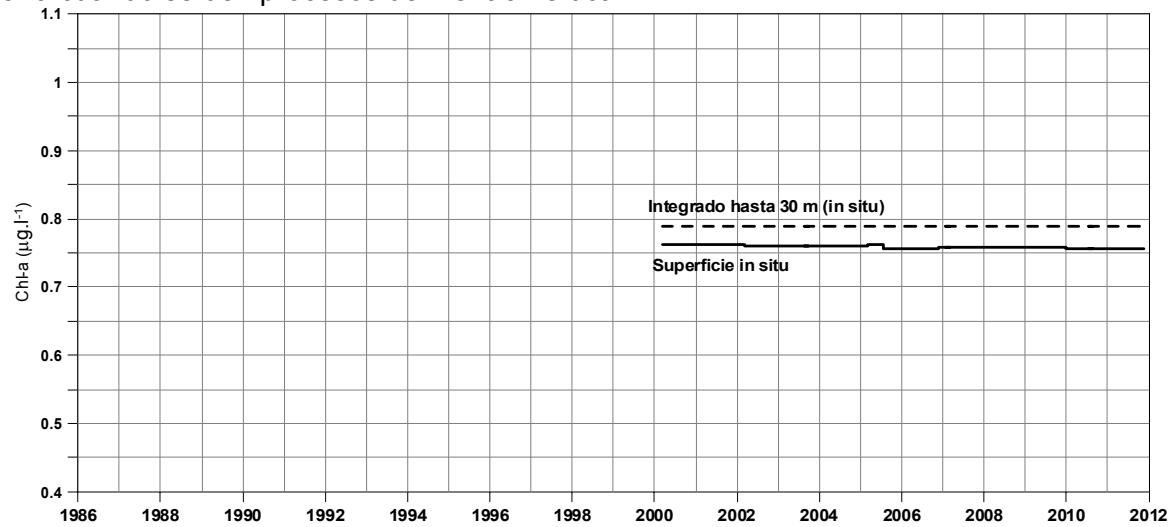


Figura 29. Estación D0, variabilidad decadal de la concentración de clorofila *in situ* (2000-2011). Se muestra el resultado del filtro KZA (5 años y 4 iteraciones).

Riesgo de eutrofización

En este apartado se han caracterizado las condiciones medias de algunas de las variables que se suelen asociar con los procesos de eutrofización (concentración de nutrientes inorgánicos, condiciones ópticas y concentración de clorofila-a), a lo largo del radial costa-océano. Para ello se han empleado los datos de la estación D0 (litoral) y la estación D2. Se asume que esta última está sometida a menor presión antrópica dada su mayor distancia a la línea de costa.

Únicamente se dispone de 40 datos, tomados entre 2002 y 2011, para nutrientes, disco de Secchi y turbidez. El número de datos no es suficiente para establecer el ciclo estacional, ya que no se dispone de información de todos los meses (sólo se realizan cuatro muestreos por año) (Tabla 1). Además, estas series tienen una longitud muy limitada todavía (10 años) que no permite analizar la variabilidad decadal con el filtro KZA. Por ello, para comparar las condiciones ambientales entre las estaciones D0 y D2 simplemente se ha aplicado un test *t-student* para datos apareados, previa transformación de los mismos (Log_{10}).

En cuanto a los nutrientes inorgánicos en superficie no se han detectado diferencias significativas entre las estaciones D0 y D2. Sin embargo, la concentración de clorofila superficial es ligeramente superior en la estación D0 (Figura 30).

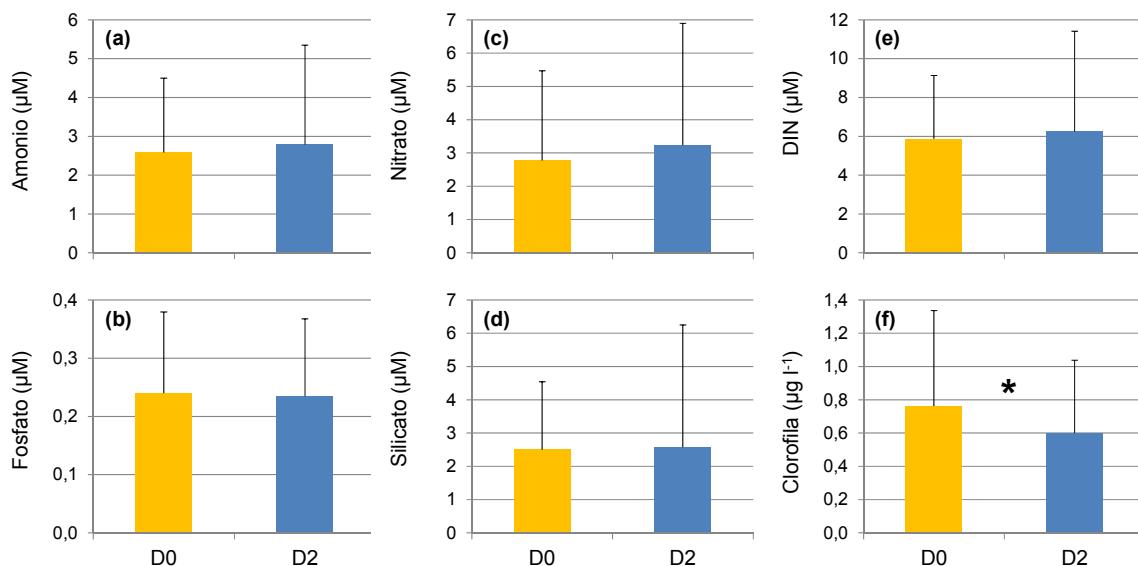


Figura 30. Promedio + desviación estándar en las estaciones D0 y D2 de la concentración de (a) Amonio. (b) Fosfato. (c) Nitrato. (d) Silicato. (e) Nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN). (f) Clorofila-a. Los datos ($n=40$) abarcan el periodo 2002-2011 (superficie). Diferencias significativas (*) $p < 0,05$.

Las concentraciones medias de nutrientes en ambas estaciones se encuentran en niveles cercanos o incluso inferiores a los que definen el estado físico-químico "Muy bueno", según los valores de referencia establecidos por Bald (2005). Dichos valores de referencia son 2,1 μM (amonio), 6,1 μM (nitrato) y 0,45 μM (fosfato). Por lo tanto, desde el punto de vista de las concentraciones de nutrientes inorgánicos, ninguna de las dos estaciones presenta problemas de eutrofización.

Aunque la estación D2 (L-REF10) se encuentre bastante más alejada de la costa que la D0 (L-OI20), su concentración de nutrientes es similar. Como ya se ha señalado, las tres estaciones del radial presentan en superficie una salinidad similar, aunque ocasionalmente la estación D2 reciba un aporte fluvial más importante que las otras debido al Adour. Esto, que se manifestaba en la variabilidad de la salinidad, también lo hace en la del nitrato y el silicato (Figura 30c, d). Los picos de estos nutrientes no señalan de forma directa la presión antrópica, como los de amonio y fosfato, sino que están más relacionados con las condiciones meteorológicas y la descarga fluvial.

Para la clorofila-a en aguas costeras se utiliza el percentil 90 como índice de presión antrópica. Al igual que la media aritmética, el percentil 90 también es ligeramente superior en la estación D0 ($1,51 \mu\text{g l}^{-1}$) respecto a la D2 ($1,32 \mu\text{g l}^{-1}$) durante el periodo 2002-2011. Según la metodología que se indica en el Anexo C, el estado de calidad biológica se clasifica justo en el límite entre "Muy bueno" y "Bueno" en la estación D0, y en "Muy bueno" en la estación D2 ($<1,5 \mu\text{g l}^{-1}$).

Es importante mencionar que la Comisión Europea ha incluido en su borrador de la decisión sobre los resultados del ejercicio de intercalibración las condiciones de referencia de la clorofila en las aguas costeras del Cantábrico. En el caso de la costa del País Vasco la referencia queda fijada finalmente en $1,0 \mu\text{g l}^{-1}$ (Anexo C). En años anteriores, para la métrica basada en la clorofila se habían utilizado valores de referencia, así como umbrales entre clases de estado, más elevados (menos exigentes).

Sin embargo, ha sido necesario ajustar dichos valores, tanto en el Cantábrico oriental (Comunidades Autónomas del País Vasco y Cantabria), como en el Cantábrico central (Principado de Asturias), durante los ejercicios de intercalibración. Los nuevos umbrales aportan resultados muy similares a los obtenidos anteriormente cuando la calidad de las masas de agua costeras del Cantábrico se evalúa en base a la clorofila. Además, aportan una información más útil a la hora de combinar los resultados con los de otras métricas ya que el EQR resultante rara vez supera el valor de 1,0.

La justificación desarrollada entre los expertos de las diferentes Comunidades Autónomas para la utilización de la nueva condición de referencia se puede consultar en el Anexo C.

En cuanto a las condiciones ópticas, las aguas de la zona offshore (D2) presentan una mayor transparencia que las del litoral (D0). Así, se detectan diferencias estadísticamente significativas en la profundidad de visión del disco de Secchi, que en promedio supone 10 m en la estación D2 y 7 m en la estación D0 (Figura 31a). La turbidez indica que las dos estaciones se encuentran en un estado físico-químico "Muy bueno", teniendo en cuenta los valores de referencia propuestos por Bald (2005): 5 NTU para muy buen estado y 150 NTU para mal estado. No se observan diferencias significativas en la turbidez medida en superficie (Figura 31b).

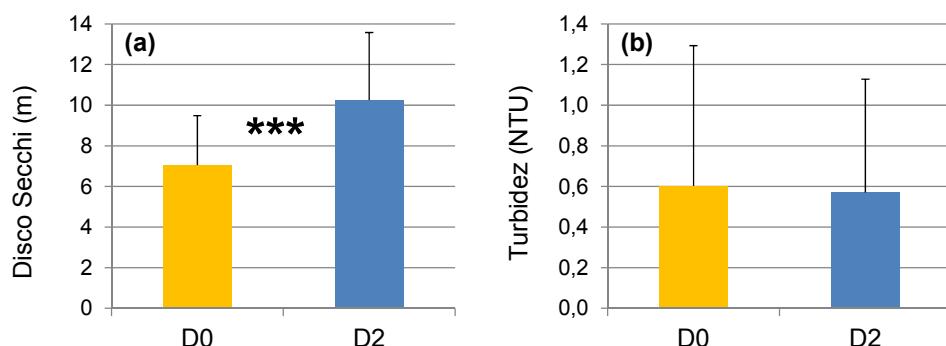


Figura 31. Promedio + desviación estándar en las estaciones D2 y D0 de (a) Profundidad de visión del disco de Secchi (b) Turbidez en superficie. Los datos en ambas estaciones ($n=40$) abarcan el periodo 2002-2011. Diferencias significativas (***) $p < 0,001$.

En resumen, los nutrientes, tanto los que tienen origen en vertidos de aguas residuales urbanas, como los que proceden fundamentalmente del drenado de las cuencas fluviales, no presentan diferencias significativas entre las aguas superficiales de la zona offshore y la zona litoral. Sin embargo, las aguas de superficie de la estación litoral tienen una concentración de clorofila superior a la de la estación offshore, y además son ligeramente más turbias.

Hay que tener en cuenta que estas dos estaciones difieren mucho en su profundidad (~30 m en la D0 y ~100 m en la D2). Por ello, en la estación D0 la capa fótica ocupa durante buena parte del año la totalidad de la columna de agua, mientras que en la estación D2 la capa fótica suele ocupar sólo la mitad de su profundidad. Esto puede explicar, en parte, que la biomasa fitoplanctónica sea mayor en la estación más cercana al litoral, donde es menos probable que ocurra limitación del

crecimiento fitoplanctónico por peores condiciones lumínicas cuando se dan procesos de turbulencia y mezcla vertical.

Por otra parte, aunque los nutrientes inorgánicos disueltos presentan concentraciones muy similares en las estaciones D0 y D2, es esperable que la estación litoral reciba mayores aportes de origen antrópico, aunque estos no se manifiesten en las concentraciones estudiadas. Hay que tener en cuenta la presencia de un emisario submarino en esta zona litoral que descarga las aguas residuales urbanas (tratadas) de la zona de Donostia y Pasaia (con una población de unos 300.000 habitantes). Además, no se han comparado las concentraciones de los nutrientes que forman parte de partículas (los datos de N_{TOTAL} y P_{TOTAL} son aún limitados). En este sentido, parte de la carga de nutrientes disueltos en el litoral podría, por asimilación biológica, transferirse a la biomasa del fitoplancton y posteriormente introducirse en niveles tróficos superiores.

Como se observa en anteriores apartados que tratan del ciclo estacional de la clorofila-a, en la estación D0 el valor medio mensual en superficie desciende levemente en verano, habiendo un descenso algo más acentuado en la D1 y aún más en la D2. Esto sugiere que en verano existe limitación por nutrientes en la zona offshore y que dicha limitación cobra menor importancia a medida que nos acercamos al litoral.

En conclusión, puede afirmarse que existe cierto gradiente de aumento de la presión de eutrofización desde la zona offshore hasta el litoral de Pasaia, aunque el efecto sobre el fitoplancton puede considerarse bastante leve (al menos en lo que se refiere a su biomasa). Así, en la última década, la estación litoral D0 (L-OI20) localizada frente a Pasaia-Asabaratz (Figura 2) presenta una calidad físico-química “Muy buena” y una calidad biológica basada en la clorofila entre “Muy buena” y “Buena”. La estación D2 (L-REF10) situada en mar abierto presenta también una calidad físico-química “Muy buena” y su calidad biológica en base a la clorofila es ligeramente superior a la del litoral (“Muy buena”).

4.2 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE TELEDETECCIÓN

4.2.1 ESPECTROMETRÍA VERSUS FLUORESCENCIA CON CTD

La correlación entre clorofila-a (chl-a) estimada por fluorescencia-CTD y las medidas espectro-radiométricas en la superficie del mar (0-1 m) durante las campañas oceanográficas es menor de lo que podría esperarse ($r^2 = 0,44$; Figura 32).

Las medidas con CTD tomadas simultáneamente con los dos métodos en una estación costera en un año completo (2009-2010), no mostraron el pico de chl-a de marzo con la misma intensidad: espectrofotometría estimó $8,86 \mu\text{g l}^{-1}$, mientras que el CTD estimó $3,31 \mu\text{g l}^{-1}$ de chl-a (Figura 33).

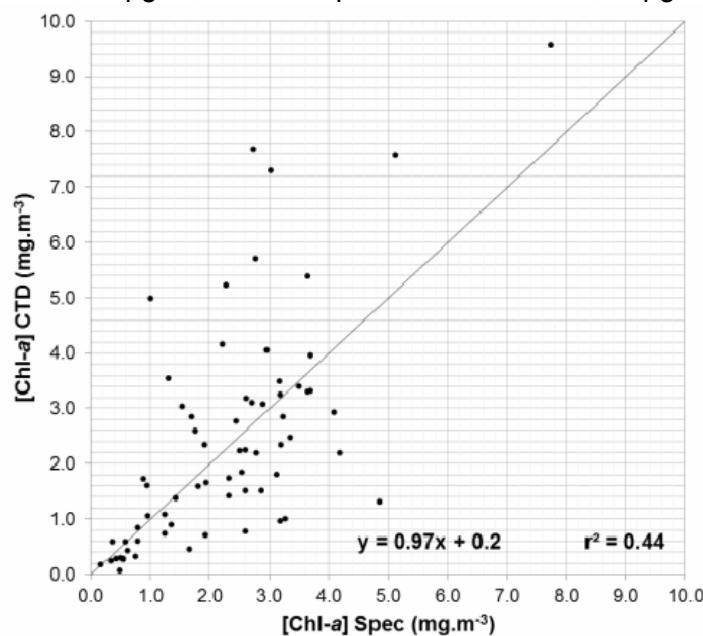


Figura 32. Concentración de chl-a estimada por espectrofotometría (Spec) y mediante CTD en las campañas oceanográficas.

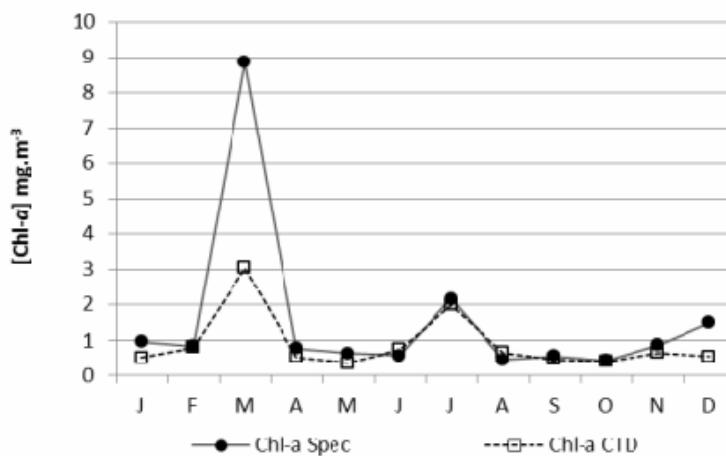


Figura 33. Medidas mensuales de chl-a en la superficie del mar medidas simultáneamente con CTD y espectrofotometría, para el 2010 en la estación del emisario (L-UR20).

4.2.2 DATOS DE SATÉLITE VERSUS MEDIDAS IN SITU

El total de pares de observaciones entre medidas de chl-a *in situ* y valores estimados por satélite fue de 95 para el algoritmo local, 100 para el OC5 y 130 con el OC3M. La diferencia entre el número de pares de observaciones es debido a las limitaciones de la aplicación del algoritmo local en el rango de reflectividades y a los diferentes grados de fiabilidad del OC5 respecto al OC3M.

Las Figura 34b) y c) muestran que la correlación entre la chl-a *in situ* y la predicha es similar para el algoritmo OC5 y el local; éstos sobreestiman en general la concentración de chl-a para valores $< 1 \mu\text{g l}^{-1}$. Mientras que la estimación no es sesgada entre 1 y $4 \mu\text{g l}^{-1}$ para el algoritmo local, el OC5 sobreestima el valor de chl-a. Para concentraciones de chl-a superiores a $4 \mu\text{g l}^{-1}$, el algoritmo local subestima y el OC5 sobreestima ligeramente. El OC3M sobreestima claramente las concentraciones de chl-a en aguas costeras (Figura 34a).

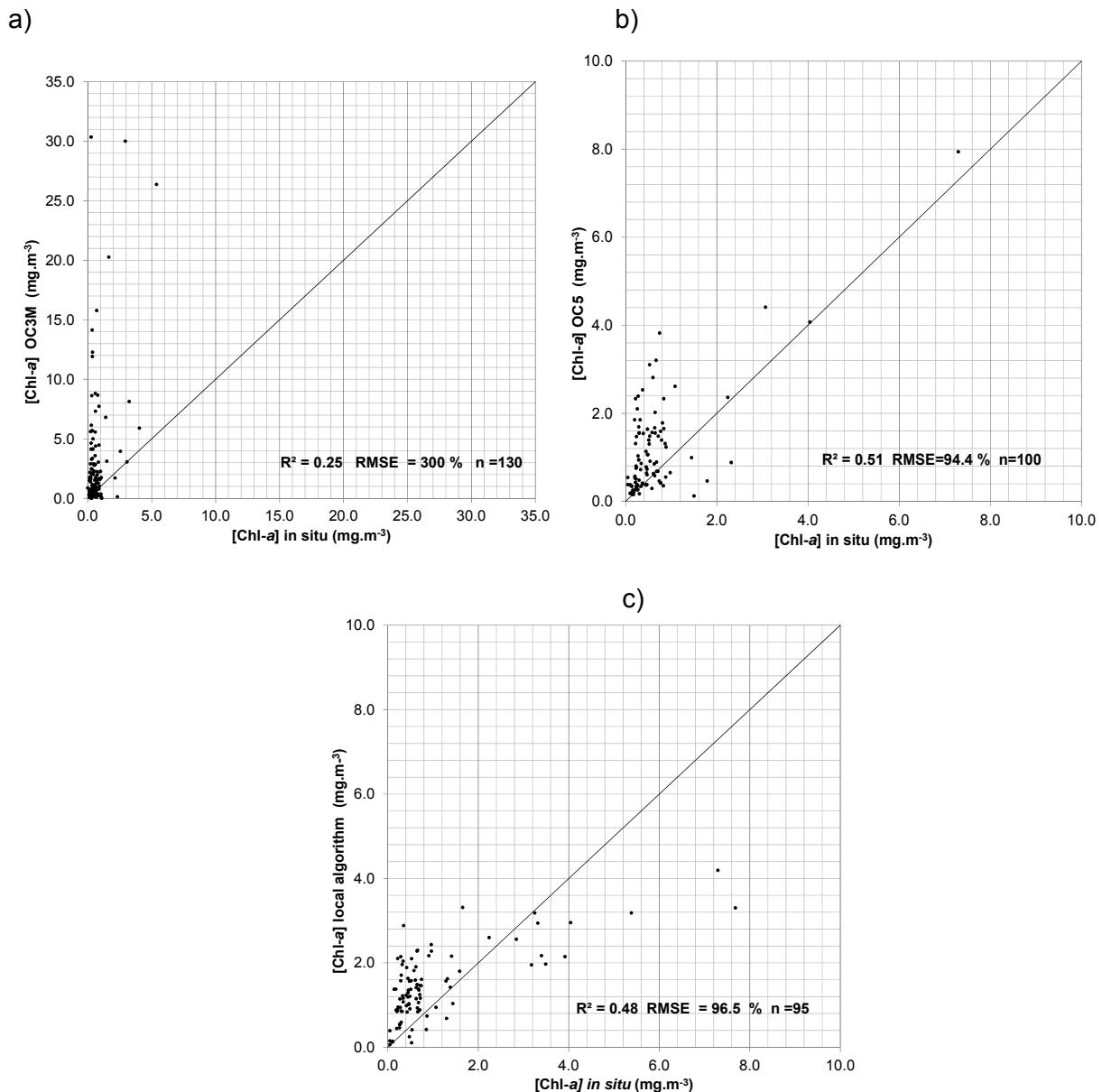


Figura 34. Comparación del valor de chl-a *in situ* con satélite mediante los algoritmos a) OC3M, b) OC5, y c) local.

4.2.3 CICLO ANUAL DE LA CLOROFILA MEDIANTE TELEDETECCIÓN

La Figura 35 (a, e) muestran la comparación entre el P90 de chl-a derivado de las medidas *in situ* cuatrimestralmente y las estimaciones por satélite mensualmente, en cada una de las masas de agua costeras y en las estaciones oceánicas.

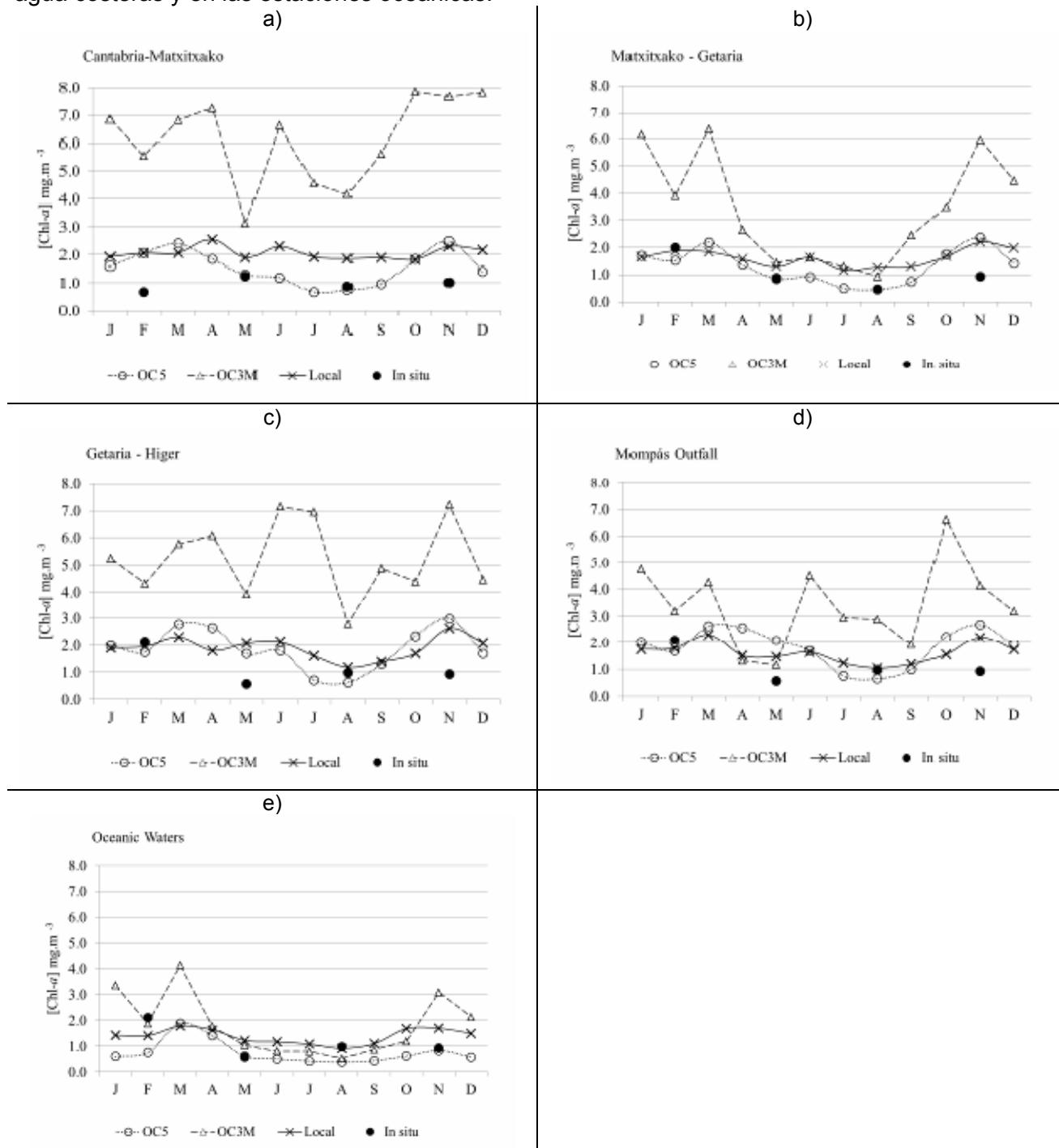


Figura 35. Ciclo anual del P90 de la concentración de chl-a observada *in situ* (trimestralmente) y por satélite (mensual) para cinco masas de agua, a) Cantabria-Matxitxako, b) Matxitxako-Getaria, c) Getaria-Higer, d) emisario de Mompás, e) aguas oceánicas.

El OC3M sobreestima en gran medida la concentración de chl-a. Tanto OC5 como el algoritmo local reproducen bien el ciclo anual observado en las medidas *in situ*, mostrando el pico de primavera en marzo y el de octubre. No obstante, el OC5 proporciona valores ligeramente superiores a las medidas *in situ* y al algoritmo local durante otoño, a excepción de las aguas oceánicas donde el ajuste es muy alto.

El OC5 y el algoritmo local mejoran sustancialmente la estimación de chl-a en aguas costeras comparado con el OC3M. Como era de esperar, en el caso de las aguas oceánicas, la diferencia entre el P90 estimado *in situ* y el estimado por OC3M es menor que en aguas costeras.

El algoritmo local muestra en general una sobreestimación de los valores de chl-a en el ciclo anual para las masas de aguas del oeste (Cantabria-Matxitxako y Matxitxako-Getaria), y durante los meses de abril a setiembre.

El OC5 estima mejor la chl-a durante los meses de abril a setiembre, pero sobreestima en el periodo de octubre a marzo, en el que la concentración promedio de chl-a es mayor. El rango de chl-a obtenido mediante OC5 es mayor que con el algoritmo local, tanto en valores medios de chl-a como con P90.

La Tabla 6 muestra el RMSE (%) calculado para los tres algoritmos. El OC3M presenta valores de error superiores al resto de algoritmos. El OC5 presenta valores de error ligeramente menores, en general, que el algoritmo local.

Tabla 6. Error cuadrático medio (%) (RMSE) entre medidas *in situ* y estimadas por los algoritmos OC3M, OC5 y local, promediado para las cinco masa de agua.

RMSE (%)	OC3M		OC5		Local	
	Mean	P90	Mean	P90	Mean	P90
Complete Year	168.0	388.7	53.7	82.5	60.7	83.7
High chl-a period (Oct-March)	218.0	430.5	62.3	99.1	62.3	91.5
Low chl-a period (April-Sept)	87.3	381.6	36.6	54.8	54.6	73.6

4.2.4 CLASIFICACIÓN DEL ESTADO DEL FITOPLANCTON

Teniendo en cuenta los resultados de la validación de los algoritmos, el OC5 fue seleccionado como el más adecuado para aplicar la clasificación del estado biológico. Se generó por lo tanto un mapa del P90 de chl-a con el OC5 (Figura 36).

Comparando la Figura 36 con la Figura 37, se aprecia que las elevadas concentraciones de TSM se corresponden con las elevadas concentraciones de chl-a.

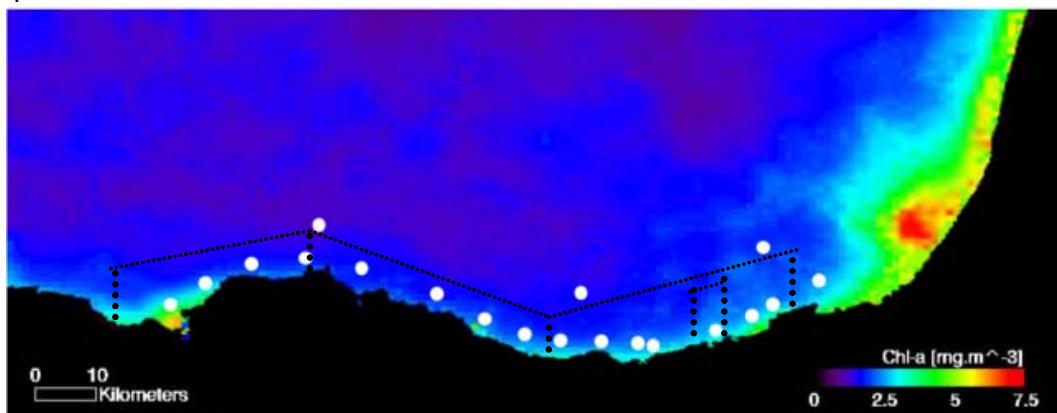


Figura 36. Mapa del percentil 90 de la concentración de chl-a estimado con el algoritmo OC5 para el periodo 2005-2010, y estaciones de la Red de Calidad.

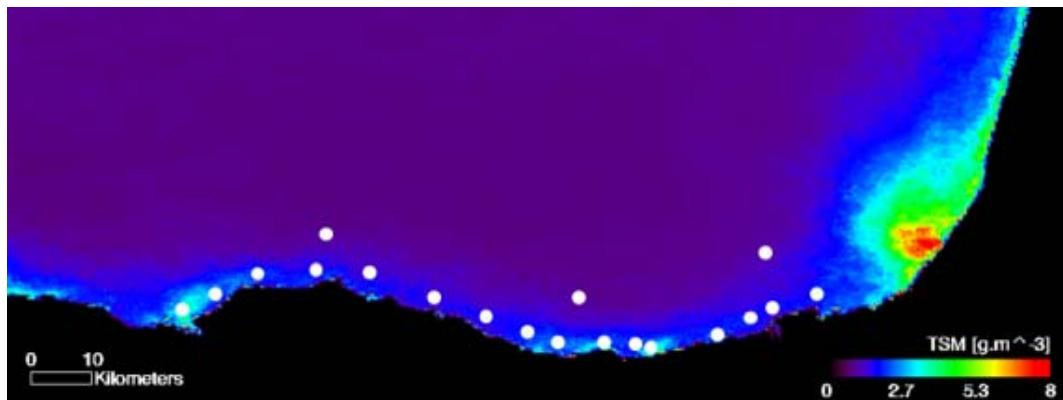


Figura 37. Mapas del percentil 90 de la concentración de material en suspensión total para el 2005-2010 periodo 2005-2010, y estaciones de la Red de Calidad.

Posteriormente, cada pixel de la imagen P90 fue asignado a una clase del estado de calidad ecológica en función de su concentración de chl-a (Figura 38).

Siguiendo los criterios establecidos en Revilla *et al.* (2009), la evaluación llevada a cabo con el muestreo *in situ* indica un estado de calidad “Muy bueno” para todas las estaciones. El mapa obtenido con el algoritmo OC5 se corresponde en un 70% con los valores de calidad *in situ* (13 de 19 presentaron estado de calidad “Muy bueno”); el resto presentaron un estado “Bueno” (Figura 38).

No obstante, considerando el valor promedio de toda la masa de agua, todas las masas de agua clasificadas mediante teledetección mostraron una correspondencia del 100% (Figura 39), presentando todas un estado de calidad “Muy bueno” (Tabla 7). La desviación estándar obtenida por satélite es menor que la obtenida con los datos *in situ*. Las 5 masas de agua comprenden 7457 puntos de información (pixeles).

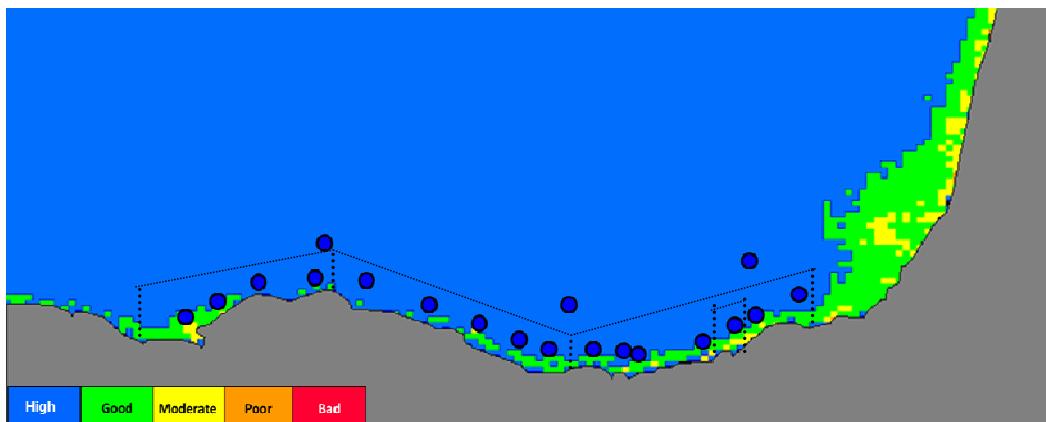


Figura 38. Mapa del estado ecológico para chl-a, obtenido mediante el algoritmo OC5. Los círculos representan el estado biológico medido *in situ* siguiendo el mismo esquema de clasificación de los colores. Se representan también los límites de las masas de agua. El criterio de clasificación utilizado en este caso es el propuesto por Revilla *et al.* (2009).

Sin embargo, en los ejercicios de intercalibración europeos recientemente se ha acordado hacer más exigente la condición de referencia de la clorofila en el Cantábrico oriental, que en adelante será $1,0 \mu\text{g l}^{-1}$ (Anexo C). Esto conlleva algunos cambios en la clasificación de la calidad biológica del fitoplancton en las estaciones de muestreo costeras, en caso de estimar la concentración de clorofila-a en éstas con imágenes de satélite.

Aplicando los nuevos umbrales entre clases de estado, las estaciones cercanas a la desembocadura del Nervión, del Deba, así como muchas de las situadas en las masas de agua Getaria-Higer y Mompás-Pasaia se clasificarían en estado “Aceptable” (Figura 39), ya que el umbral entre el estado “Bueno” y el “Aceptable” es ahora $3 \mu\text{g l}^{-1}$ (Anexo C).

La Directiva Marco indica que cuando las masas de agua presentan un estado “Aceptable” o peor deben aplicarse medidas correctoras. Los valores de P90 estimados con imágenes de satélite a escala de masa de agua (esto es, utilizando los valores de concentración de clorofila a lo largo de toda su extensión, no sólo los obtenidos en las estaciones de muestreo) se indican en la Tabla 7. En las masas de agua costera oscilan entre 2,1 y 2,8 $\mu\text{g l}^{-1}$, lo que indicaría un estado “Bueno” en todas ellas, utilizando los umbrales más recientes (Anexo C). La masa de agua costera con menor concentración de clorofila es Matxitxako-Getaria y la de mayor concentración es Getaria-Higer. En las aguas oceánicas el valor de P90 resultante con el método de teledetección es 1,34 $\mu\text{g l}^{-1}$, lo que indica un estado “Muy bueno” en la zona bajo la Directiva de la Estrategia Marina Europea.

Tabla 7. Estadísticos de chl-a y estado de cada masa de agua. Nótese que los umbrales empleados en esta tabla corresponden a los de años anteriores (Revilla *et al.*, 2009), mientras que los acordados en los últimos ejercicios de intercalibración (octubre de 2012) son mucho más exigentes (Anexo C).

Zona	Media [Chl-a] <i>In situ</i> (mg.m ⁻³)	Desviación estándar <i>In situ</i> (mg.m ⁻³)	P90 [Chl-a] <i>In situ</i> (mg.m ⁻³)	Estado ecológico <i>In situ</i>	Media [Chl-a] Satélite OC5 (mg.m ⁻³)	Desviación estándar Satélite OC5 (mg.m ⁻³)	P90 [Chl-a] Satélite OC5 (mg.m ⁻³)	Estado ecológico Satélite OC5
Cantabria- Matxitako	0,65	0,58	0,96	Muy bueno	0.89	0.33	2.37	Muy bueno
Matxitxako-Getaria	0,61	0,62	1,09	Muy bueno	0.80	0.30	2.08	Muy bueno
Getaria-Higer	0,75	0,58	1,18	Muy bueno	1.01	0.38	2.81	Muy bueno
Mompás	0,69	0,50	1,14	Muy bueno	1.01	0.35	2.61	Muy bueno
Oceánica (MSFD)	0,58	0,85	1,00	Muy bueno	0.40	0.29	1.34	Muy bueno

Por lo tanto, pese a que con el método de teledetección muchas de las estaciones de muestreo cercanas a la línea de costa quedarían clasificadas en un estado que requiere acciones correctoras (“Aceptable”), la clasificación del conjunto de la masa de agua costera no se vería penalizada (“Bueno”).

En comparación, los datos de clorofila *in situ* indican un estado “Muy bueno” no sólo en las aguas oceánicas, sino también en todas o la mayoría de las costeras (Getaria-Higer, dependiendo del periodo evaluado puede estar en el límite con “Bueno”, véase Anexo C).

Esto lleva a concluir que, para proporcionar una estima fiable de la calidad del agua basada en la concentración de clorofila-a se recomienda un uso complementario de datos de satélite y medidas *in situ* (Novoa *et al.*, 2012). Los datos *in situ* son necesarios en las estaciones costeras, sobre todo en las cercanas a las desembocaduras de los ríos, cubiertas por la DMA, donde el satélite puede sobreestimar; mientras que la teledetección es muy útil para cubrir el monitoreo de las 200 millas náuticas requerido por la Directiva de la Estrategia Marina Europea.

Algunas de las zonas de alta concentración de clorofila identificadas con teledetección se encuentran en la desembocadura de los ríos con mayor caudal (Nervión, Deba, Oria y Bidasoa) (Valencia *et al.*, 2004). Por lo tanto, en esos casos posiblemente exista una interferencia del material detrítico procedente de los ríos con la señal satelital de clorofila. Sin embargo, en las estaciones cercanas al Oiartzun y al emisario de Pasaia (L-UR20), los niveles de clorofila son relativamente altos y en estos casos podrían indicar un efecto antropogénico (Figura 39).

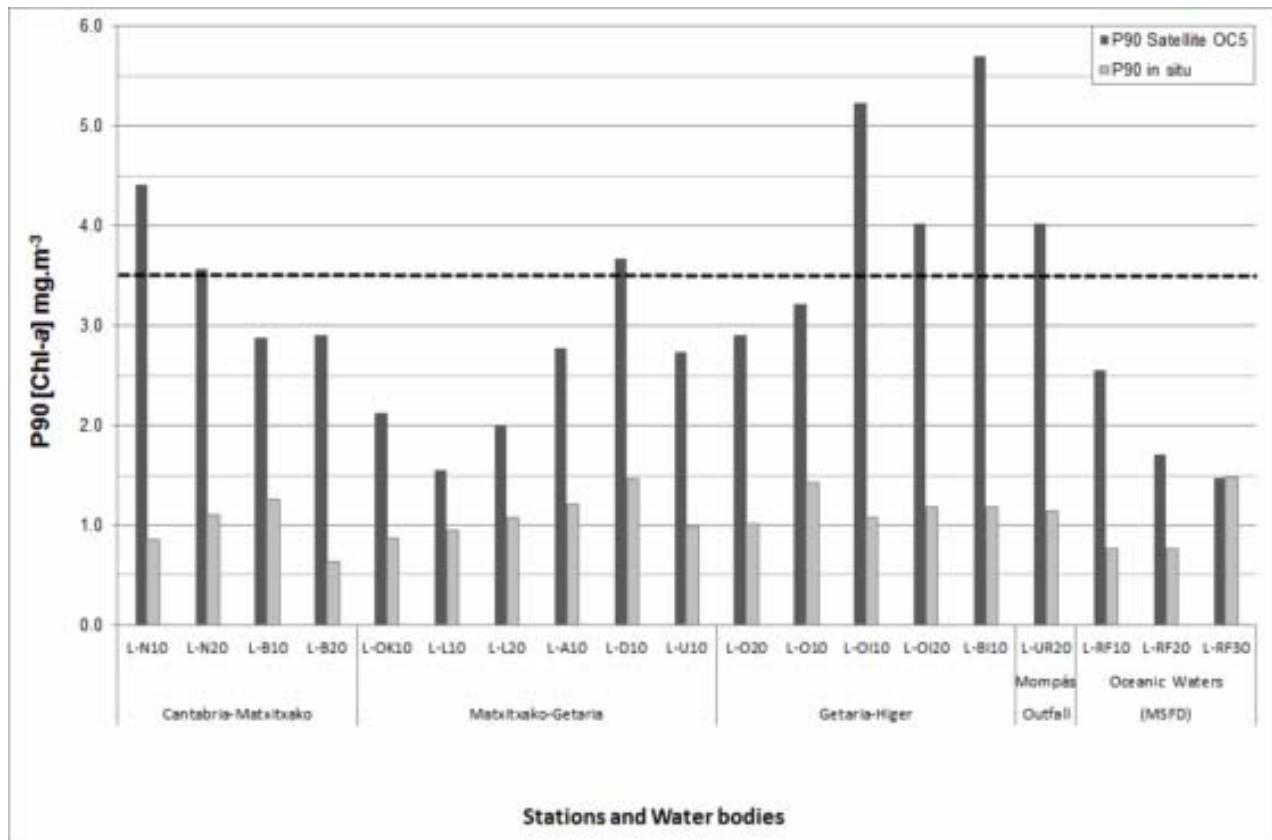


Figura 39. Percentil 90 de la concentración de chl-a para el periodo 2005-2010, para cada estación, estimado con el OC5 y medidas *in situ*. La línea discontinua indica el límite entre el estado ecológico “Muy bueno” y “Bueno” ($P90 = 3,5 \mu\text{g l}^{-1}$) propuesto por Revilla *et al.* (2009). Nótese que los umbrales acordados en los últimos ejercicios de intercalibración europeos son mucho más exigentes (Anexo C).

4.2.5 ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS DESCARGAS DE RÍOS EN LA CALIDAD DE LAS AGUAS COSTERAS COLINDANTES

Variabilidad diaria

Las imágenes antes y después del evento de altas precipitaciones registradas el 13 de enero del 2009, muestran un incremento de clorofila-a en la zona costera un día después del evento (Figura 40). En el caso del Nervión, la descarga fluvial aumentó durante el mismo día y registró valores máximos durante el día después.

En la Figura 41 se muestran los resultados medios de 13 eventos de altas precipitaciones en el Nervión. En este caso la turbidez y la materia orgánica medidas *in situ*, presentan un incremento máximo un día después de las máximas precipitaciones. La clorofila-a, los sólidos en suspensión y la turbidez medidas desde el satélite registran sus máximos valores 2 días después del evento.

La correlación entre precipitación y caudal es máxima durante el mismo día pero se mantiene positiva durante 7 días. Lo mismo ocurre entre precipitación y turbidez *in situ*. Sin embargo la correlación entre precipitación y materia orgánica sólo se observa el mismo día del evento.

Este tiempo de respuesta tan rápido no coincide con los resultados de otros autores. En particular García-Soto *et al.* (1990) describieron un tiempo de respuesta de la producción primaria de 4-5 días después de un evento de lluvias en un estuario próximo al del Nervión. Álvarez *et al.* (2009) sugirieron un retraso de 7 a 9 días para detectar un aumento de la productividad primaria tras el aporte de nutrientes en zonas de afloramiento en el Cantábrico. Una posible explicación de estos resultados es que el incremento de la concentración de clorofila observado no sea debido a un

aumento de la producción primaria, sino a un aumento de la cantidad de fitoplancton por arrastre de aguas fluviales o estuáricas hacia el litoral. De hecho, algunos estudios muestran la presencia de diatomeas bentónicas en la columna de agua de las zonas costeras del País Vasco (Borja *et al.* 2010).

Por otro lado, como se ha señalado en el anterior apartado, las altas concentraciones de material particulado y de turbidez de estas aguas durante los eventos lluviosos puede tener como efecto una sobreestimación de los valores de clorofila-a por medio de las imágenes de satélite (Lahet *et al.*, 2001; Bowers *et al.*, 2009).

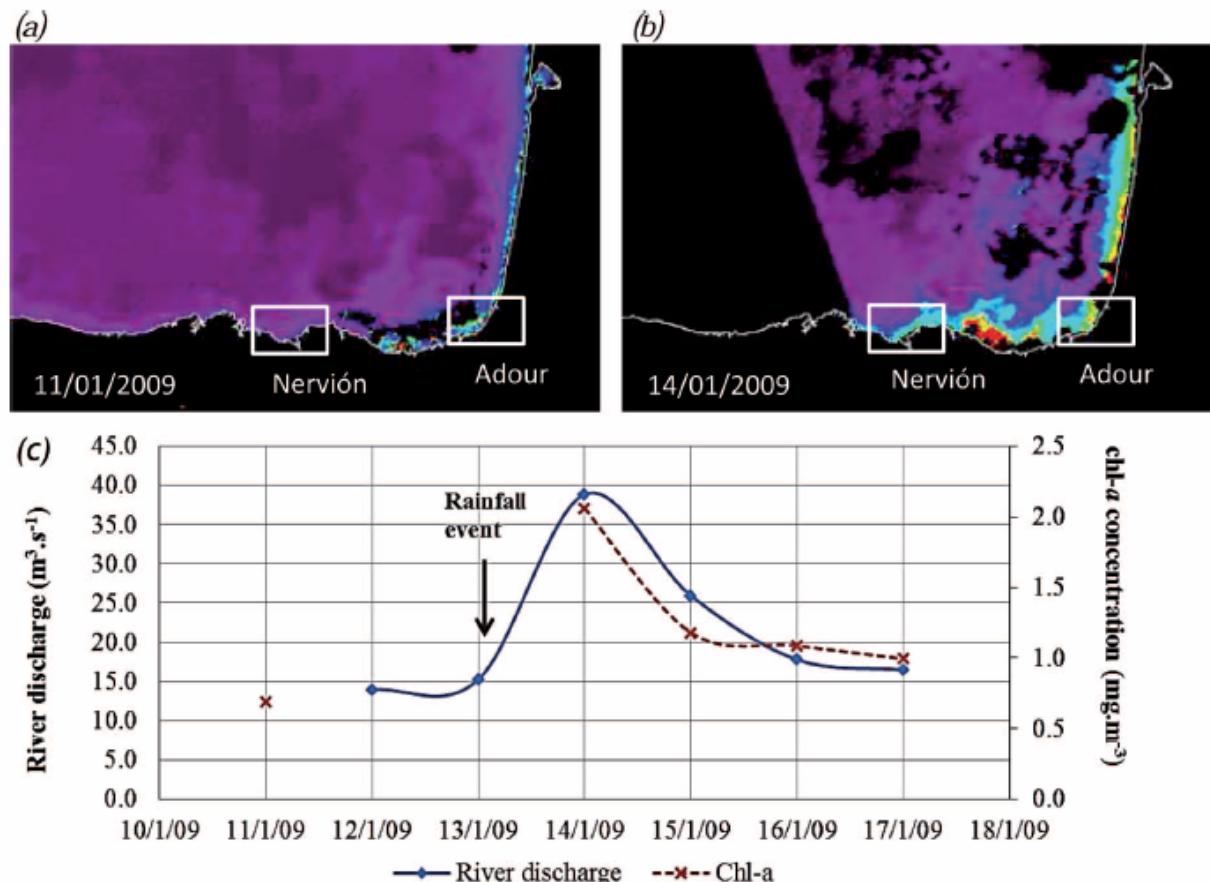


Figura 40. Imágenes MODIS de clorofila-a estimada con el algoritmo OC5 (a) antes y (b) después del evento de altas precipitaciones del 13 de enero del 2009. (c) Frente al Nervión, el incremento de chl-a (línea discontinua) se observó un día después del evento, mientras que la curva de caudal (línea continua) mostró un incremento durante el mismo día llegando a su máximo durante el día después.

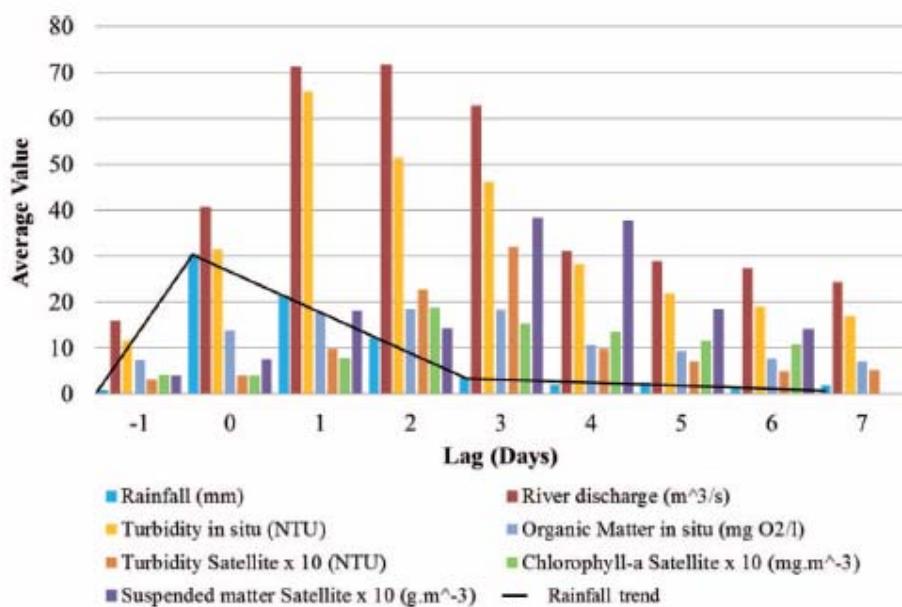


Figura 41. Diagrama que muestra la evolución temporal de diferentes variables medidas *in situ* (precipitación, caudal, materia orgánica y turbidez) en la estación del Nervión, y variables medidas con satélite en la misma localización (clorofila-a, material en suspensión y turbidez). Los valores reflejan el promedio de 13 eventos de lluvias. Algunos parámetros han sido transformados para permitir una visualización conjunta.

Variabilidad estacional

Las imágenes mensuales de P90 de clorofila calculadas entre los años 2005-2010 (Figura 1) muestran patrones estacionales generales similares en la zona costera y zona oceánica. En la zona oceánica se observa el máximo absoluto de concentración de clorofila (P90) en primavera (marzo-abril), y otro secundario en noviembre-diciembre. Los valores mínimos en la zona oceánica se sitúan durante los meses de verano para ambos parámetros.

En las zonas costeras (Figura 42) se perciben algunas diferencias espaciales: en la zona del Adour las máximas concentraciones de clorofila se registran en mayo, y también aparece un pico secundario (más evidente en las imágenes del P90) en febrero. Sin embargo en el Nervión, los picos de clorofila-a y P90 se sitúan en noviembre (valores máximos) y en marzo.

La relación entre incremento de clorofila-a y el caudal del Nervión está estrechamente correlacionada salvo en el caso de junio donde se produce un incremento de clorofila independiente del caudal del río. En el Adour, los picos de clorofila-a se producen en mayo, mientras que los picos de caudal se sitúan en abril-mayo.

Los valores de caudal durante los meses de primavera son altamente variables, como lo muestran las barras de desviación estándar de la Figura 42.

En resumen, el patrón estacional del Adour y del Nervión varía ligeramente. En el Adour, su régimen pluvio-nival hace que los máximos caudales y valores de clorofila-a se registren entre abril y junio. El patrón estacional del Nervión es más similar al patrón de zonas oceánicas y sigue una correlación más estrecha con el régimen pluvial excepto en junio donde aparece un pequeño pico de clorofila independiente de las lluvias.

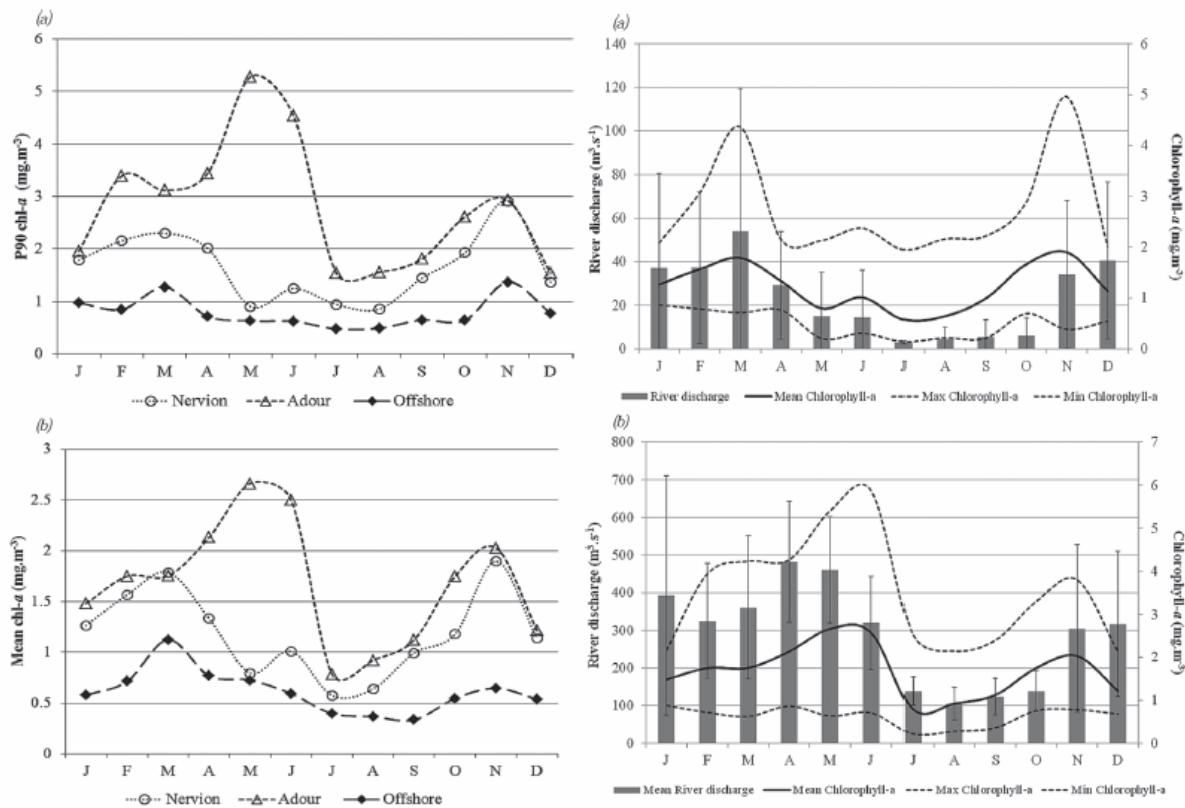


Figura 42. Izq.: (a) P90 de clorofila y (b) promedio de clorofila para el periodo 2005-2010 en tres localizaciones: pluma del Nervión, pluma del Adour y estación de referencia en zona oceánica. Dcha.: Medias, máximos y mínimos mensuales de clorofila-a solapados con los valores mensuales promedio y desviaciones estándar del caudal de los ríos (a) Nervión y (b) Adour para el periodo 2005-2010.

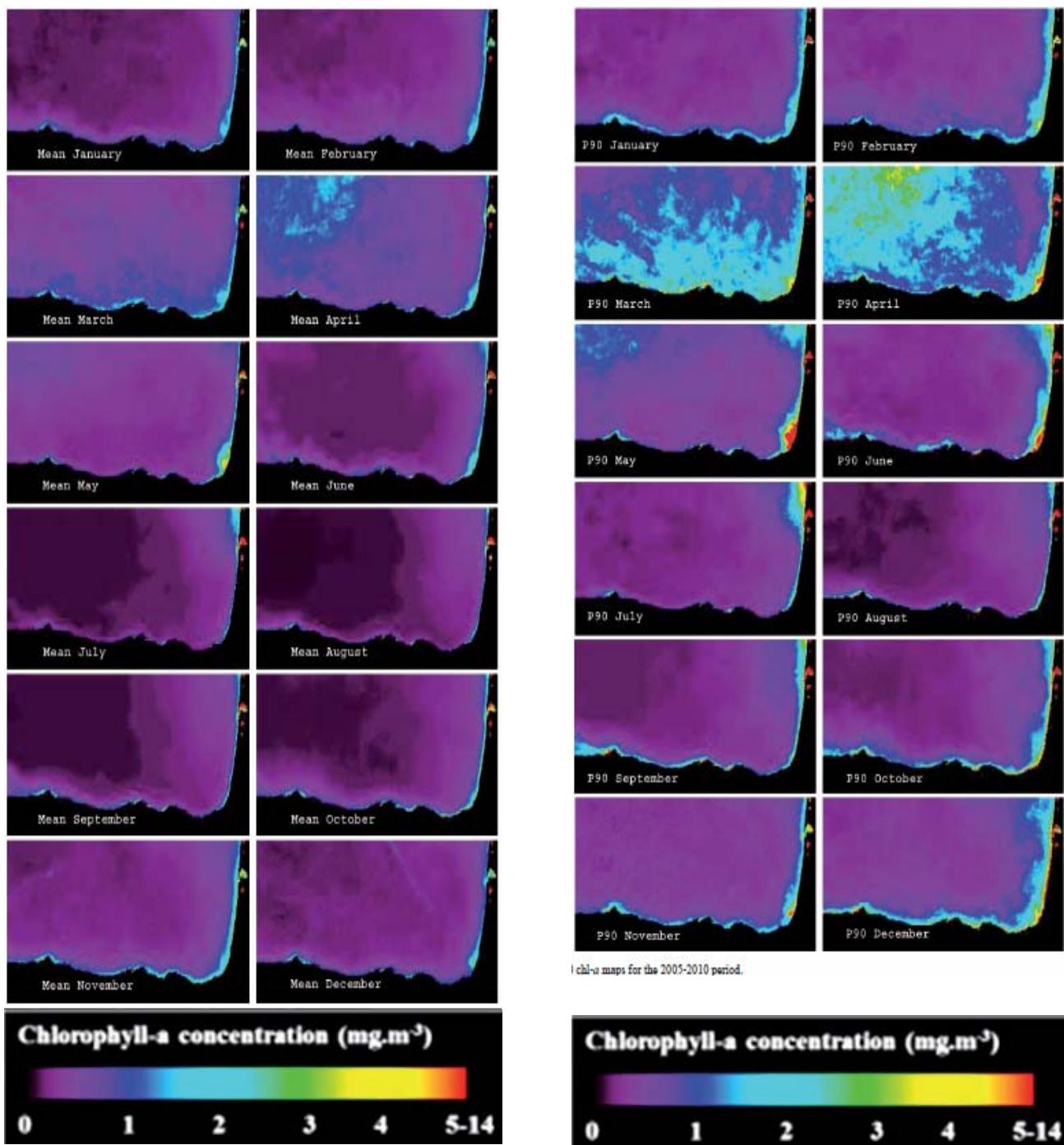


Figura 43. Imágenes MODIS mensuales de Clorofila-a (izq.) y P90 (dcha.), para el periodo 2005-2010.

Área de influencia de las plumas fluviales en costa

Tal y como se percibe en la Figura 44, la curva estacional de clorofila cambia muy ligeramente a medida que nos alejamos del estuario. En general las concentraciones van disminuyendo hacia la zona oceánica. La extensión influenciada por la pluma del Adour es significativamente mayor que la influenciada por la pluma del Nervión.

Se perciben algunas diferencias mensuales en cuanto a la distancia donde se producen los máximos de clorofila: en el Nervión se observan un pico en junio a 1,2 millas náuticas, que no se observa a mayores distancias. Asimismo las concentraciones de clorofila en noviembre superan a las de marzo en esta distancia y no más allá. En cuanto al Adour, el mes con más concentración de clorofila es mayo, y esta influencia se extiende hasta las 8 millas, más allá en las 11 millas es marzo el mes que más concentración de clorofila registra.

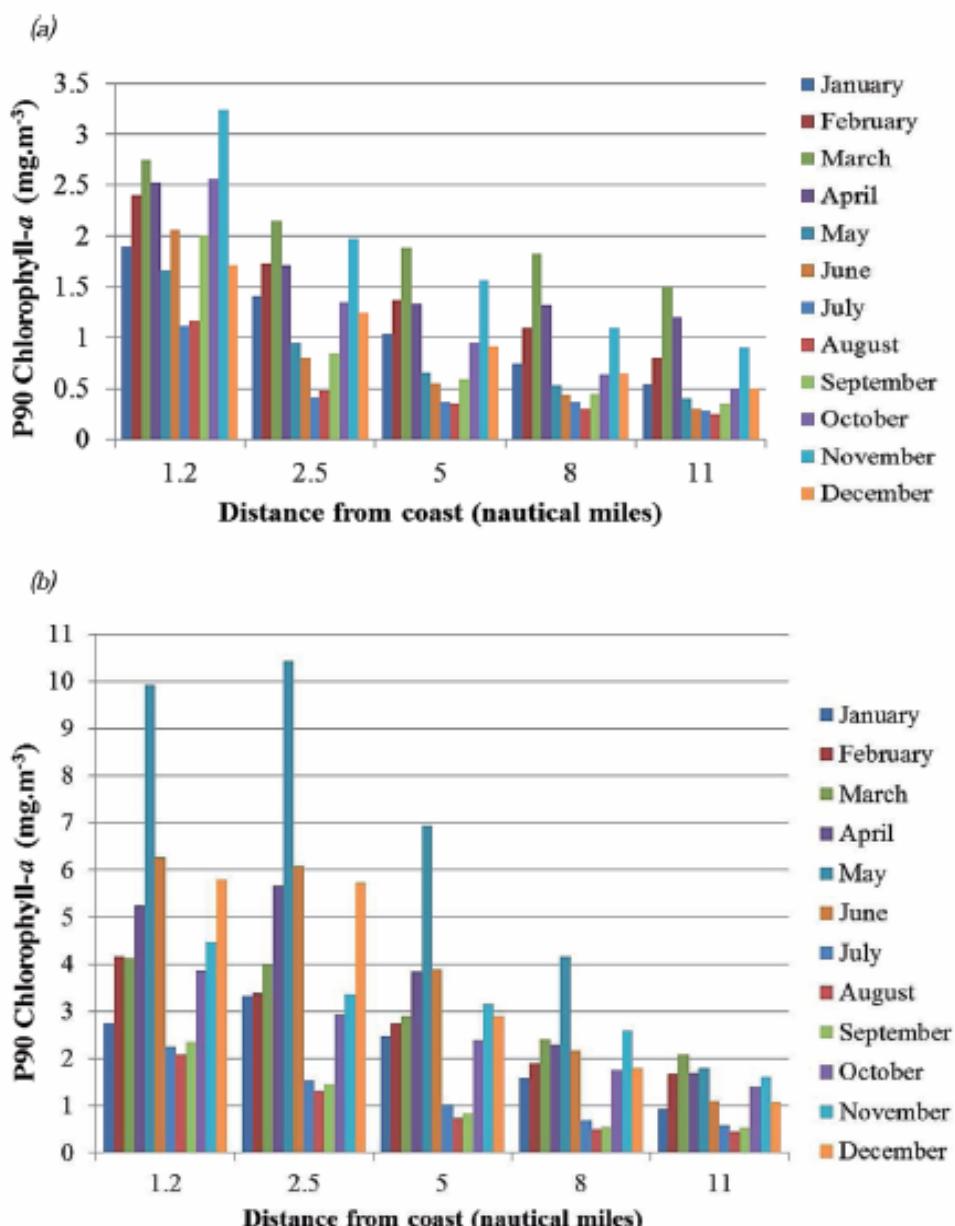


Figura 44. Variación estacional de los valore P90 de clorofila en función de la distancia a costa (desde 1,2 hasta 11 millas náuticas) en los estuarios de (a) el Nervión y (b) el Adour.

Tendencias interanuales

El cálculo de las tendencias temporales de las variables de clorofila-a (satélite e *in situ*), del caudal, la precipitación y de la turbidez por satélite dieron como resultado los valores que se muestran en la Tabla 8.

Para las concentraciones de clorofila medidas por satélite, se encuentra una tendencia decreciente estadísticamente significativa en las zonas costeras y una tendencia creciente en las aguas oceánicas, en el periodo 2005-2010.

La tendencia negativa de la clorofila en las zonas costeras, frente a las desembocaduras de los ríos, aparece también con las medidas *in situ*, y podría ser explicada por el efecto de la puesta en marcha de los programas de control de contaminación en el estuario del Nervión en 2001 (García-Barcina *et al.*, 2006), y en el Adour en 1975 (Tudesque *et al.*, 2008). Otra posible causa podría ser el incremento de caudal y turbidez que se aprecia y que debido a su efecto sobre la disponibilidad de luz en las aguas podría dificultar el crecimiento de fitoplancton en estas zonas.

En aguas oceánicas los resultados son contradictorios para la clorofila-a medida *in situ* (tendencia negativa) y para la estimada con satélite (tendencia positiva). Revilla *et al.* (2010) también encontraron una tendencia positiva para la clorofila-a medida *in situ* en la capa superficial, en una serie que abarcaba un periodo más amplio (1986-2010). Además, como se indica en este mismo informe, con medidas *in situ* se han encontrado descensos en la capa superficial (0-1 m) e incrementos en la capa fótica (0-50 m), en los últimos 25 años. Esto podría indicarnos que la medida del satélite en mar abierto, donde la profundidad de penetración de la radiación es mayor que en la zona costera debido a la claridad de las aguas, no corresponde únicamente a la capa superficial del mar, sino que integra una capa más profunda.

Tabla 8. Valores de pendiente resultantes del análisis de tendencias para diferentes parámetros en el periodo 2005-2010. El asterisco indica que el valor es estadísticamente significativo.

slope	chl-a (<i>in situ</i>)	chl-a (satellite)	River discharge	Rainfall	Turbidity (satellite)
Nervión	-0.0220*	-0.0027*	0.0012*	0.0002*	0.0086*
Adour		-0.0020*	0.067*		0.0103
Offshore	-0.0010*	0.0017*			0.0141

5. CONCLUSIONES

Análisis de series temporales largas de chl-a y variables meteorológicas, hidrográficas y físico-químicas, y estudio de la relación entre dichas variables, en un radial costa-océano de la plataforma costera del País Vasco.

Las condiciones climáticas y océano-meteorológicas de la costa vasca han sufrido cambios importantes desde 1950, lo cual puede haber influido en la concentración de clorofila-a y en su distribución vertical a lo largo de la columna de agua, como se comenta a continuación. Se han detectado patrones de variabilidad a largo plazo en la nubosidad, la temperatura atmosférica y la temperatura superficial del mar.

El análisis efectuado a partir de 1950 muestra un primer periodo, de unos 15 años, en el que se observan condiciones moderadas-altas de insolación y temperatura. Posteriormente hay una transición hacia un periodo frío y con insolación relativamente baja, situación que abarca la década de los 70 y la primera mitad de los 80, aproximadamente. A mediados de los 80 comienza a producirse un cambio hacia condiciones opuestas: la insolación y la temperatura atmosférica aumentan bruscamente, y la temperatura superficial del mar inicia una tendencia de ascenso que culmina a mediados de los años 90 con un brusco incremento. La década del 2000 no presenta cambios y se caracteriza por temperatura e insolación en promedio superior a la del resto de la serie.

Los patrones detectados en las condiciones océano-meteorológicas de la costa vasca pueden relacionarse con cambios a gran escala. El periodo frío que caracteriza la década de los 70 coincide con el enfriamiento del Atlántico Norte asociado a la “Gran Anomalía Salina”. Posteriormente, el cambio que se produce en las décadas de los 80 y los 90 hacia mayor insolación y temperatura podría explicarse en relación con el índice climático EA (Patrón del Atlántico Este), que tiene una influencia importante en sureste del golfo de Vizcaya. En concreto, el EA cambia bruscamente de fase negativa a fase positiva durante los años 80 y la fase positiva se incrementa durante la década de los 90. La fase positiva del EA se asocia con condiciones más cálidas y menores precipitaciones, principalmente en otoño e invierno, asociadas a una circulación dominante del suroeste.

Las anteriores tendencias a largo plazo han sido detectadas mediante el método del filtro KZA (*Kolmogorov-Zurbenko Adaptive*) que consiste en una media móvil iterativa. En la aplicación del KZA se ha utilizado un semiancho de ventana de 7 años y 5 iteraciones, de modo que el resultado del filtro está libre de la variabilidad aleatoria (datos extremos), la estacional y la de período inferior a 16 años (aproximadamente 7+5), con lo cual se retiran los ciclos decaduales y una gran parte de otros ciclos del largo período como el nodal.

Analizando un periodo reciente (1986-2011) con el filtro KZA, en este caso a escala decadal debido a la menor longitud de la serie, se han detectado muchos de los cambios anteriormente referidos en las condiciones océano-meteorológicas, así como algunas variaciones importantes en la concentración de clorofila-a. Además, se han observado patrones de variabilidad similares con otro método distinto de análisis de series que está basado en anomalías acumuladas.

Para la clorofila-a, en la estación D2, situada a unos 13 km de la línea de costa (estación denominada L-REF10 en la Red de Calidad) se ha detectado un descenso de la concentración superficial (0-1 m), en la década de los 90. Así, la concentración media entre 1986 y 1996 es cercana a $0,75 \mu\text{g l}^{-1}$, pasando a estar luego en torno a $0,60 \mu\text{g l}^{-1}$. Este descenso en la biomasa fitoplanctónica coincide con el cambio de fase positiva a fase negativa en el índice NAO y con la intensificación de la fase positiva del índice EA.

Los citados cambios en los índices climáticos reflejan una modificación brusca en los patrones de circulación atmosférica, que conlleva un aumento de la temperatura atmosférica y calentamiento de las aguas superficiales. Este calentamiento podría haber hecho disminuir la productividad

fitoplanctónica en la capa superficial de la columna de agua, al intensificar la estratificación estival, lo que derivaría en una menor disponibilidad de nutrientes.

Por el contrario, la clorofila promediada en los primeros 50 m (que equivalen al grosor medio de la capa fótica en esta zona) manifiesta un brusco incremento al comienzo de la década del 2000, que supone un cambio de 0,45 a 0,65 $\mu\text{g l}^{-1}$, aproximadamente. El aumento de la biomasa fitoplanctónica en la zona productiva de la columna de agua sería coherente con un aumento del caudal fluvial en los años 90 que llevaría consigo un mayor aporte de nutrientes. También hay que recordar que desde mediados de los 80 nos encontramos en un periodo de poca nubosidad en el contexto de los últimos 60 años. Por lo tanto, la disponibilidad de luz favorecería el crecimiento del fitoplancton en capas más profundas.

En la estación L-REF10 los cambios detectados a escala decadal en la concentración de clorofila-a son relativamente importantes. En superficie suponen un descenso cercano al 25% sobre la concentración inicial. Por el contrario, en los primeros 50 m y en la columna de agua completa (100 m) se da un incremento en torno al 40-50%. El aumento que tiene lugar por debajo de la capa superficial no daría lugar a una penalización en la evaluación de la calidad del agua, ya que el método actualmente aplicado para la Directiva Marco evalúa las concentraciones *in situ* entre 0 y 1 m. No obstante, a la hora de aplicar indicadores de estado ecológico o ambiental basados en la clorofila debería tenerse en cuenta que puede haber variaciones a largo plazo en esta variable a diferentes profundidades de la columna de agua, incluida la capa de superficie, debido a procesos a gran escala que no tienen relación con las presiones antrópicas.

En los ejercicios de intercalibración europeos, estas conclusiones se han tenido en cuenta para establecer las condiciones de referencia (condiciones correspondientes a nulo o muy bajo impacto antropogénico) de la clorofila, en el Cantábrico oriental.

En cuanto a los futuros trabajos hay que indicar la importancia de mantener series temporales de larga duración para la adquisición de datos *in situ* con una frecuencia suficientemente adecuada. Como se ha visto con este estudio, las series de datos obtenidas para las variables océano-meteorológicas, físico-químicas y para la clorofila-a han permitido describir patrones a largo plazo y explicar las causas de cambios relevantes en la dinámica fitoplanctónica. Sería interesante estudiar con mayor detalle la influencia del clima sobre los aportes de nutrientes a la costa, para lo cual se necesitaría recopilar y estudiar series adicionales de datos de larga duración en el entorno de la D2 (por ejemplo, el grosor de la capa de mezcla en otoño e invierno, la concentración de nutrientes en diferentes épocas del año, el grado de estratificación estival, etc.).

Desarrollo de un algoritmo específico para la zona de estudio, que permita una estima fiable de la chl-a a partir de imágenes de teledetección.

En cuanto a las investigaciones efectuadas sobre teledetección, hay que indicar que las imágenes de satélite del sensor MODIS permitieron estimar, para el periodo 2001-2005, la concentración de clorofila-a superficial en las masas de aguas costeras con una frecuencia 40 veces mayor que la obtenida mediante el monitoreo basado en muestreos oceanográficos. Además, las imágenes de satélite proporcionaron una información de 7457 puntos para las 5 masas de agua, comparado con las 19 estaciones *in situ*.

Tanto el algoritmo satelital OC5 como el local representan una mejora sustancial con respecto al algoritmo OC3M en la estimación de clorofila-a superficial en las aguas costeras vascas; no obstante, el OC5 es ligeramente mejor que el local en líneas generales. Existe aún una cierta desviación entre las medidas de *in situ* y las derivadas por teledetección, y su origen podría deberse a múltiples causas: diferente número de muestras según el método, diferente escala espacial y profundidad muestreada con cada método y diferencias temporales entre las medidas.

La evaluación obtenida por teledetección indica una calidad inferior para las estaciones de muestreo costeras en comparación con la evaluación llevada a cabo con los datos *in situ* de clorofila obtenidos en las campañas de la Red de Calidad. El estado de calidad integrado espacialmente para las masas de agua resulta "Bueno" con teledetección y "Muy bueno" con datos *in situ* (salvo en Getaria-Higer, donde también es cercano a "Bueno").

Un uso complementario de ambas metodologías de adquisición de datos es conveniente para proporcionar una evaluación eficiente y representativa de la calidad del agua en el contexto de las directivas europeas.

El muestreo *in situ* es adecuado para las estaciones costeras, sobre todo para las cercanas a las desembocaduras de los ríos, cubiertas por la Directiva Marco del Agua, donde el satélite podría sobreestimar la clorofila-a en algunas áreas cercanas a la línea de costa, o en condiciones de elevada concentración de material en suspensión; mientras que la teledetección sería muy útil para cubrir el monitoreo de las 200 millas náuticas requeridas por la Directiva de la Estrategia Marina.

Además, en las zonas costeras el método de adquisición de datos de clorofila con teledetección, debido a su alta frecuencia, puede aportar una información interesante sobre eventos que tienen lugar a corta escala temporal, como el efecto de las descargas de los ríos en épocas de alta pluviosidad.

Por lo tanto, se puede concluir que la teledetección es un método que proporciona una información útil para la evaluación de la calidad del agua, por su alta frecuencia temporal y por su capacidad de cubrir exhaustivamente la zona de interés.

ANEXO A – RECOPILACIÓN DE SERIES DE DATOS

A continuación se muestran los datos empleadas en este trabajo para el análisis de series temporales de larga duración. Las posiciones de las estaciones de muestreo del transecto frente al estuario del Oiartzun (radial D) pueden verse en la Figura 2.

Concentración de clorofila

ESTACIÓN D2

Los datos de los perfiles correspondientes a 26 años de medida (1986-2011) se han representado superpuestos en la Figura 45. Como puede observarse, los primeros 50 m incluyen todo el rango de valores; además, a mayores profundidades los valores máximos no superan $3 \mu\text{g l}^{-1}$ y la mayoría de las concentraciones están por debajo de $1 \mu\text{g l}^{-1}$. Esta información se utilizó para establecer una profundidad de integración representativa de la capa fótica, que fuera homogénea a lo largo del tiempo.

En general, se asume que la capa fótica equivale a la zona de la columna de agua con luz suficiente para que el fitoplancton pueda crecer (véase apartado de metodología). La profundidad de la capa fótica se estableció en base a los perfiles verticales de PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). En la estación D2 se observó que generalmente estaba comprendida entre 37,5 y 52,5 m, aunque podían darse casos de valores muy bajos (<30 m) por la influencia de plumas fluviales o, por el contrario, muy elevados (>60 m) durante períodos de baja productividad. Teniendo en cuenta su valor medio (46 ± 13 m; $n = 103$) y que la clorofila desciende drásticamente por debajo de -50 m (Figura 45), en todos los perfiles se ha utilizado una profundidad de 50 m para determinar, a grosso modo, la zona de crecimiento del fitoplancton.

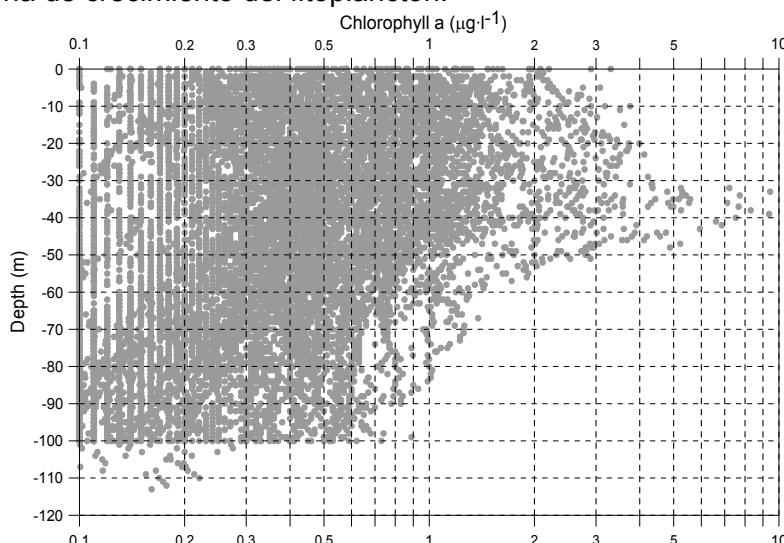


Figura 45. Perfiles verticales de clorofila-a en la estación D2 entre 1986 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 198 muestreos *in situ*.

En la Figura 46 se han representado todos los perfiles consecutivamente, interpolando en el eje vertical y a lo largo del tiempo. La distribución vertical de la clorofila alterna situaciones de bastante homogeneidad y baja concentración ($<1 \mu\text{g l}^{-1}$), con otras en las que se observan acumulaciones de biomasa distribuidas heterogéneamente entre la superficie y los primeros 50 m.

En la Figura 47 b, c, d se presentan todos los datos de clorofila-a *in situ* utilizados en los análisis estadísticos (series 1986-2011). Para obtener estas series, los perfiles verticales se procesaron de forma que los datos fueran representativos de la capa superficial (valor entre 0 y 1 m), la capa fótica (promedio entre 0 y 50 m de profundidad) y la columna de agua (promedio entre 0 y 100 m).

Además, en la Figura 47 a se presenta la serie de datos de clorofila-a obtenida mediante teledetección (SeaWiFS) en el pixel más cercano a esta estación y para el periodo más largo disponible (finales de 1997-finales de 2010).

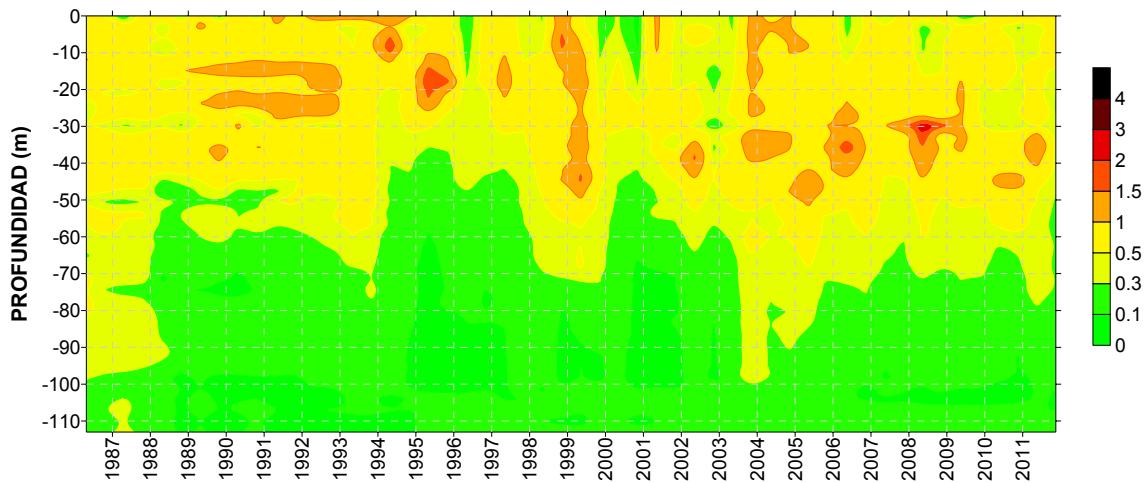


Figura 46. Variación temporal de la distribución de la clorofila-a ($\mu\text{g l}^{-1}$) en la columna de agua de la estación D2 entre 1986 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 198 muestrados *in situ*.

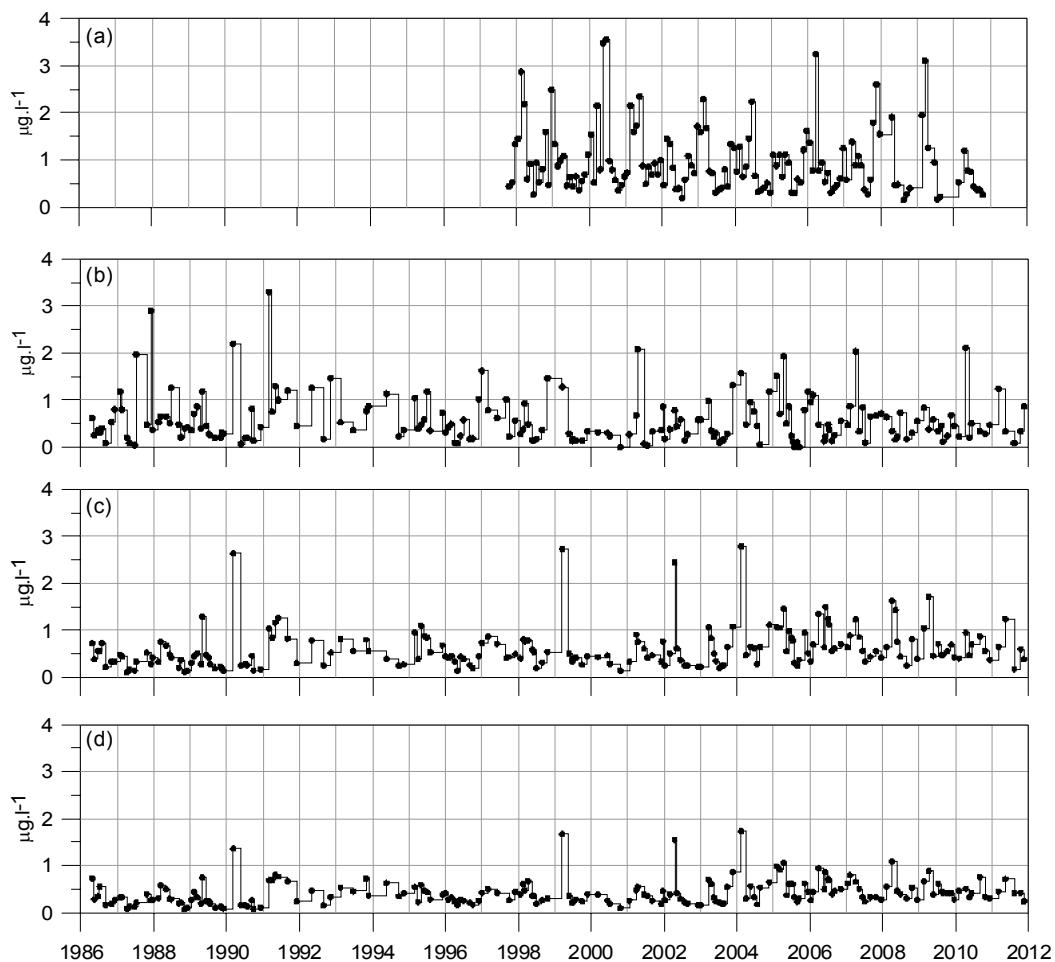


Figura 47. Datos de clorofila-a en la estación D2. (a) SeaWiFS, n=142; (b) *in situ* superficial, n=198; (c) *in situ* promediada hasta 50 m, n=198 (d) *in situ* promediada hasta 100 m, n=195.

En cuanto a los datos que proceden de muestreos *in situ*, las series de clorofila superficial y clorofila promediada en la capa fótica tienen un total de 198 datos cada una y la serie de clorofila promediada en la columna de agua tiene 195.

El número de muestreos y los meses en los que se han realizado no se mantienen uniformes en el tiempo. Los años 1992, 1993 y 1994 presentan muchos huecos (3-4 muestreos/año), el resto oscilan entre 5 y 12 muestreos/año. Tomando la serie completa (1986-2011), en promedio se han realizado casi ocho muestreos al año (7,6).

Los datos de satélite son medias mensuales de imágenes diarias; dichos valores mensuales presentan algunos huecos entre 2008 y finales de 2010.

En este informe también se presenta, de manera preliminar, la serie de valores máximos de clorofila-a medidos en el eje vertical de la columna de agua de la estación D2, así como su localización (profundidad) (ver Figura 48).

Hay que recordar que hasta el año 1992, el muestreo de clorofila-a *in situ* se realizó con botella a profundidades discretas en la columna de agua (0, 5, 10, 20, 30, 50, 75 y 100 m) y posteriormente, con perfiles continuos de CTD (mediciones con un intervalo de 1 m). Por tanto, podría haber cierto sesgo en los valores máximos debido al cambio de método de muestreo, ya que a partir de 1993 aumenta el tamaño de la muestra en el eje vertical (sobre todo por debajo de los 30 m) y con ello, la probabilidad de encontrar valores más altos, así como la probabilidad de encontrarlos a mayor profundidad.

Además, por ahora, esta serie se ha obtenido buscando el valor máximo de manera automática, y aún no se han representado los perfiles uno a uno para comprobar que el valor máximo corresponde a un pico bien definido.

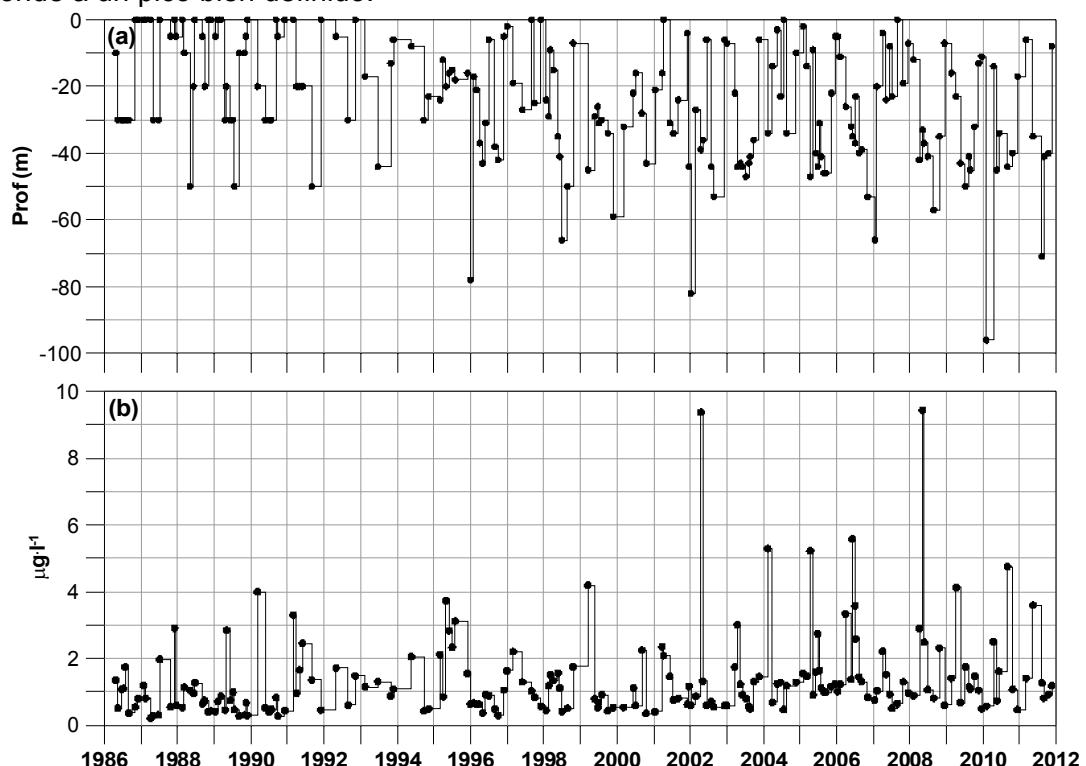


Figura 48. Serie de valores máximos de concentración de clorofila-a en la estación D2 (a) Profundidad a la que se encuentra el máximo en la columna de agua (b) Valor máximo en la columna de agua.

Estación D1

Para la estación cercana al litoral, D1 (Figura 2), situada a unos dos kilómetros de la línea de costa, se dispone de datos de concentración de clorofila a partir del año 2000. Los perfiles verticales de clorofila, obtenidos con las medidas de fluorescencia *in situ* del CTD se muestran superpuestos en la Figura 49.

La profundidad de la columna de agua en esta estación es menor que en la estación offshore D2. Por ello, los perfiles en la D1 llegan como máximo a 70 m, frente a los 110 m que se miden en la D2 (Figura 45). En promedio, en la D1 la profundidad de los perfiles de clorofila realizados es 57 ± 6 m (media \pm desviación estándar; $n=89$).

En la estación D1 no se han observado concentraciones superiores a $5 \mu\text{g l}^{-1}$, al contrario que en la D2 donde algunas están en el rango de 5 a $10 \mu\text{g l}^{-1}$ (Figura 45). Aunque los datos conjuntos de estas estaciones no son directamente comparables, ya que en la D2 se dispone de 15 años más de medidas y se han realizado unos 100 muestreos más que en la D1, los valores máximos de la estación D2 (que se encuentran entre 30 y 50 m de profundidad) tuvieron lugar principalmente a partir del año 2000 (Figura 46). Esto indicaría una mayor productividad en la estación D2.

En la estación D1 no se han estudiado en detalle los perfiles del PAR para obtener una serie completa de datos de profundidad de la capa fótica. Sin embargo, el cálculo de dicha profundidad en varios casos tomados al azar indica que la atenuación luminosa en esta estación puede considerarse del mismo orden que en la D2.

Por lo tanto, en la D1 se ha asumido que los primeros 50 m representan, a grosso modo, la capa fótica (donde llega el 1% de la luz incidente en la superficie y tienen lugar los principales procesos biológicos). No obstante, como ya se ha comentado, el espesor de esta capa varía temporalmente (debido a la turbidez ocasionada por plumas costeras, períodos con mayor o menor biomasa planctónica, etc.).

Teniendo en cuenta lo anterior, en la estación D1 se ha promediado la concentración de clorofila en los primeros 50 m, para obtener una estima que represente aproximadamente la capa fótica, así como también la columna de agua completa (ya que la mayoría de los perfiles tienen una profundidad máxima muy cercana a 50 m).

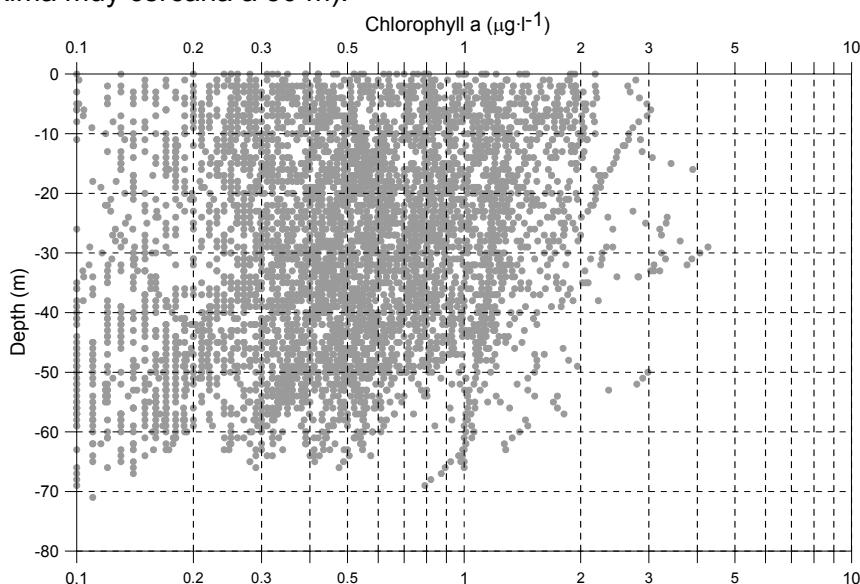


Figura 49. Perfiles verticales de clorofila-a en la estación D1 entre 2000 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 89 muestreos *in situ*.

Para conocer la distribución vertical típica de la clorofila-a en la estación D1 se han representado todos los perfiles consecutivamente, interpolando en el eje vertical y temporal (Figura 50) Al igual que en la estación D2, la clorofila en la D1 alterna situaciones de homogeneidad vertical y bajas concentraciones ($<1 \mu\text{g l}^{-1}$), con otras en las que se observan acumulaciones del orden de $2-5 \mu\text{g l}^{-1}$ a distintas profundidades.

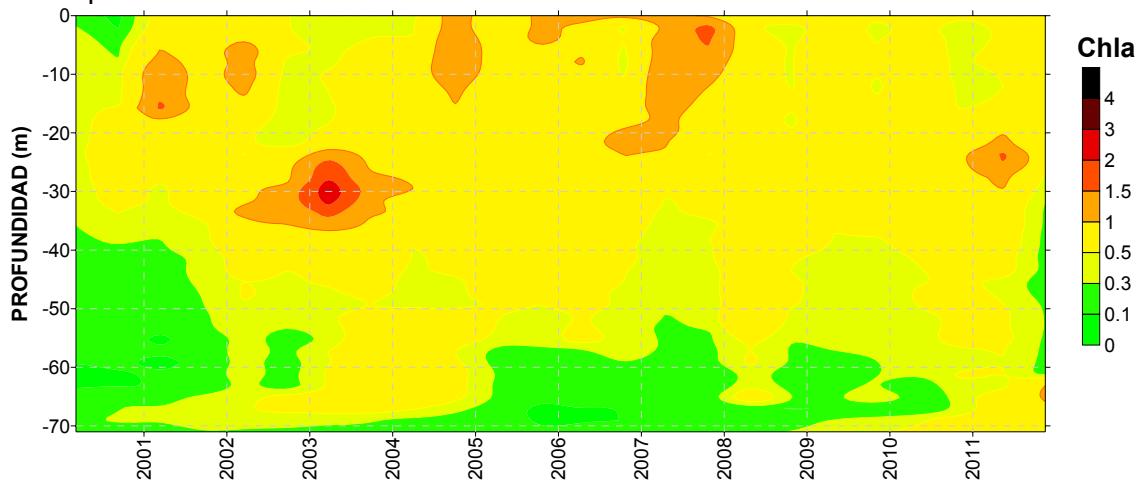


Figura 50. Variación temporal de la distribución de la clorofila-a ($\mu\text{g l}^{-1}$) en la columna de agua de la estación D1 entre 2000 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 89 muestreos *in situ*.

En la Figura 51 se presentan las series de datos de clorofila-a de la estación D1 utilizadas para los análisis estadísticos. Al igual que en la estación D2, los perfiles verticales se han procesado para obtener series representativas de la capa superficial (valor entre 0 y 1 m) y de la capa fótica (media aritmética entre 0 y 50 m de profundidad) que en este caso se utiliza también como estimación de la columna de agua completa. Además, se presentan los datos obtenidos mediante teledetección (SeaWiFS) en el pixel más cercano y para el periodo más largo disponible.

En cuanto a los datos de muestreos *in situ* (2000-2011), las series de clorofila superficial y promediada hasta 50 m tienen un total de 89 datos cada una y la serie de SeaWiFS (1997-2010) tiene 52 datos. Estos últimos corresponden a medias mensuales de imágenes diarias y presentan muchos huecos en la serie.

El número de muestreos *in situ* y los meses en los que se han realizado éstos no se mantienen uniformes y oscilan entre 4 y 12 muestreos/año. Hasta la fecha (12 años) se han realizado $7,5 \pm 2,2$ muestreos/año.

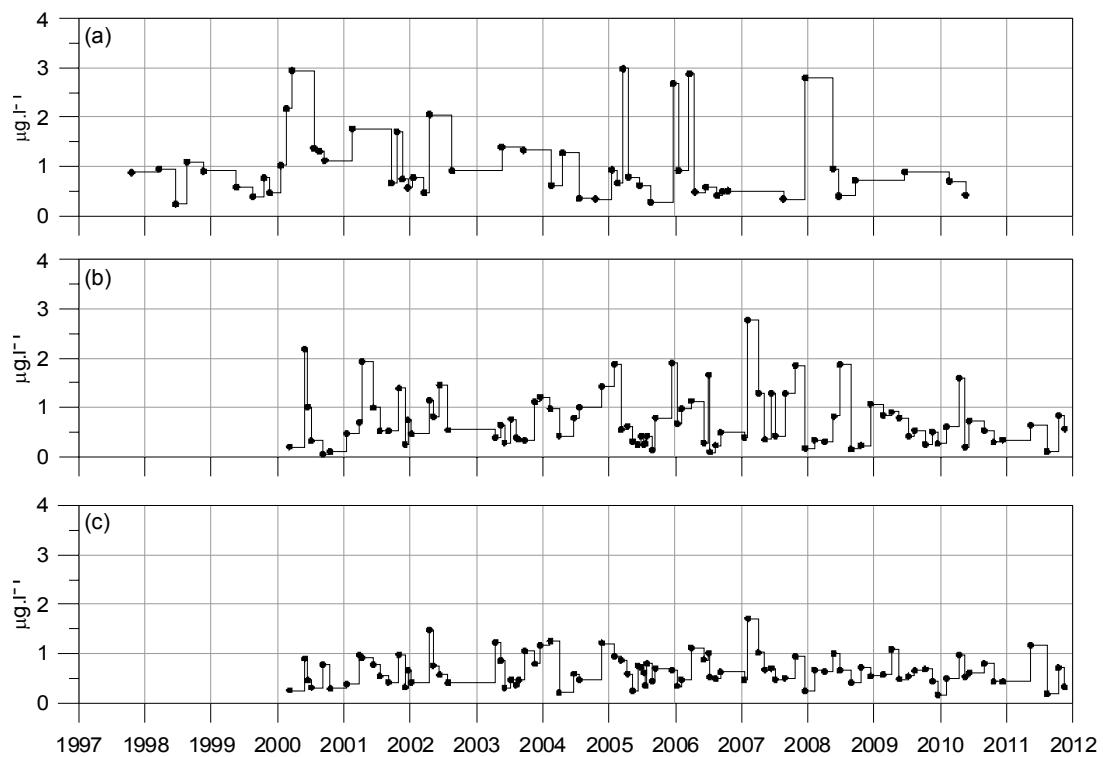


Figura 51. Datos de clorofila-a en la estación D1. (a) SeaWiFS, n=52; (b) *in situ* superficial, n=89; (c) *in situ* promediada hasta 50 m, n=89.

Estación D0

Para la estación más cercana a la línea de costa, D0 (Figura 2) también denominada estación L-OI20 en la Red de Calidad, hay datos de clorofila-a desde 2000. Los perfiles verticales se muestran superpuestos en la Figura 52. La profundidad de la columna de agua en esta estación es mucho menor que en las anteriores. Los perfiles oscilan entre -18 y -42 m, y la media se sitúa en -32 m.

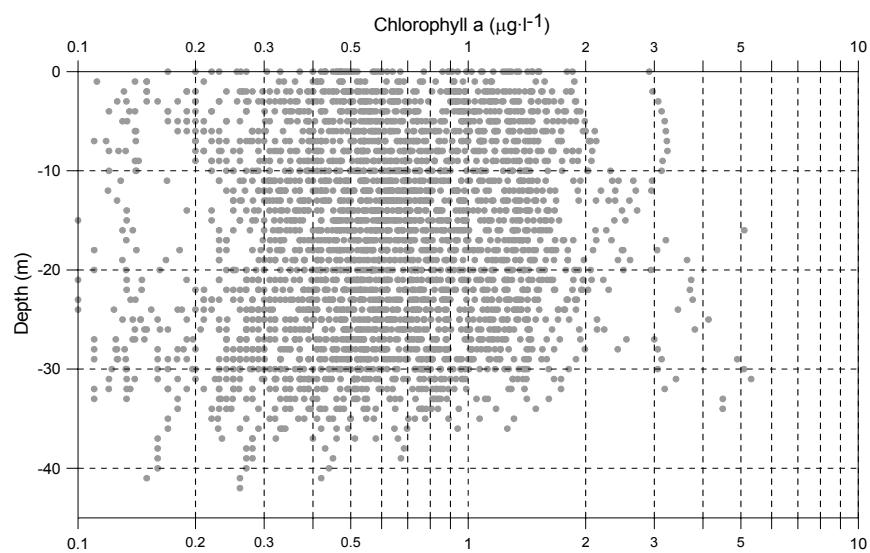


Figura 52. Perfiles verticales de clorofila-a en la estación D0 entre 2000 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 104 muestreos *in situ*.

A la vista de los perfiles de PAR, en la estación D0 la capa fótica generalmente ocupa toda la columna de agua. Por ello, un criterio válido para obtener la concentración representativa de esta capa sería realizar el promedio de la clorofila hasta la profundidad máxima.

Sin embargo, dado que la profundidad máxima en la D0 presenta bastante variación a lo largo de los muestreos, con el fin de homogeneizar en lo posible la serie y no introducir otra fuente de variabilidad, se ha utilizado la profundidad de 30 m en esta estación para promediar la clorofila en todos los perfiles. Sólo un 11% de los perfiles presentan una profundidad menor (25 m generalmente), lo que requiere en estos casos realizar el promedio de la clorofila en la columna de agua con un número de datos ligeramente inferior al resto.

En la Figura 53 se representan los perfiles de clorofila a lo largo del tiempo en la D0. Al igual que en las estaciones D2 y D1, la distribución vertical de la clorofila presenta mucha variabilidad. En comparación con la estación más cercana, D1, se observa una mayor frecuencia de picos ($2-5 \mu\text{g l}^{-1}$) en la estación D0.

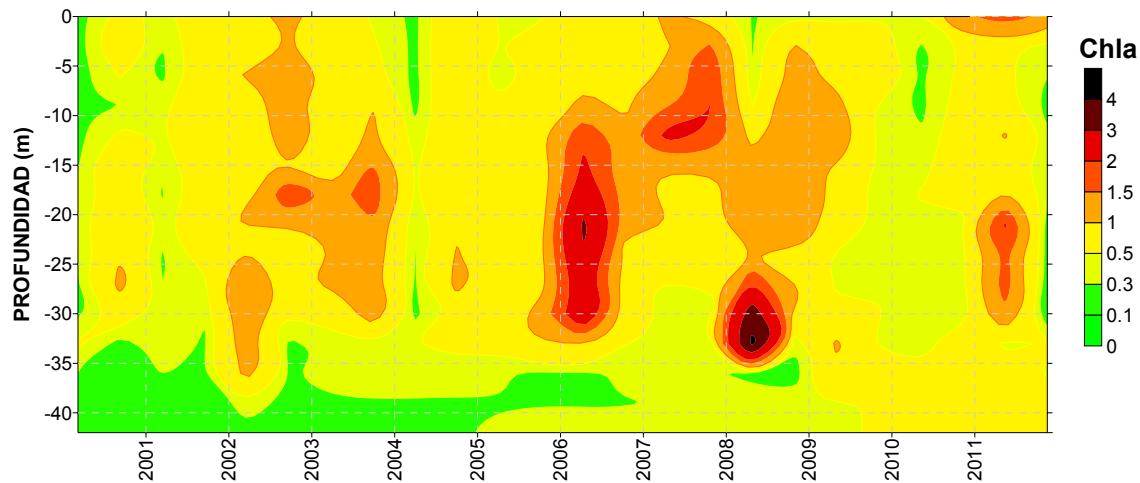


Figura 53. Variación temporal de la distribución de la clorofila-a ($\mu\text{g l}^{-1}$) en la columna de agua de la estación D0 entre 2000 y 2011 inclusive. La figura incluye los perfiles de 104 muestreos *in situ*.

En la Figura 54 se presentan las series de datos de clorofila-a de la estación D0 utilizadas para los análisis estadísticos (2000-2011). Los perfiles anteriormente descritos se han procesado para obtener series de datos representativas de la capa superficial (valor entre 0 y 1 m) y de la capa fótica (media aritmética de los valores medidos entre 0 y 30 m de profundidad); esta última puede considerarse equivalente a la totalidad de la columna de agua en la estación D0.

Para la estación D0 no se han obtenido concentraciones de clorofila con satélite (SeaWiFS), ya que el campo de las imágenes (9 km x 9 km) resulta muy amplio y en el pixel entran zonas terrestres que invalidan los datos.

Las series de clorofila medida *in situ*, superficial y promediada en la capa fótica, contienen un total de 103 datos cada una. Al igual que en las estaciones D2 y D1, el número de muestreos y los meses en los que se han realizado no son uniformes. Para la estación D0 en todo el periodo (12 años) se han hecho entre 6 y 12 muestreos/año. En promedio hay $8,6 \pm 2,0$ datos/año.

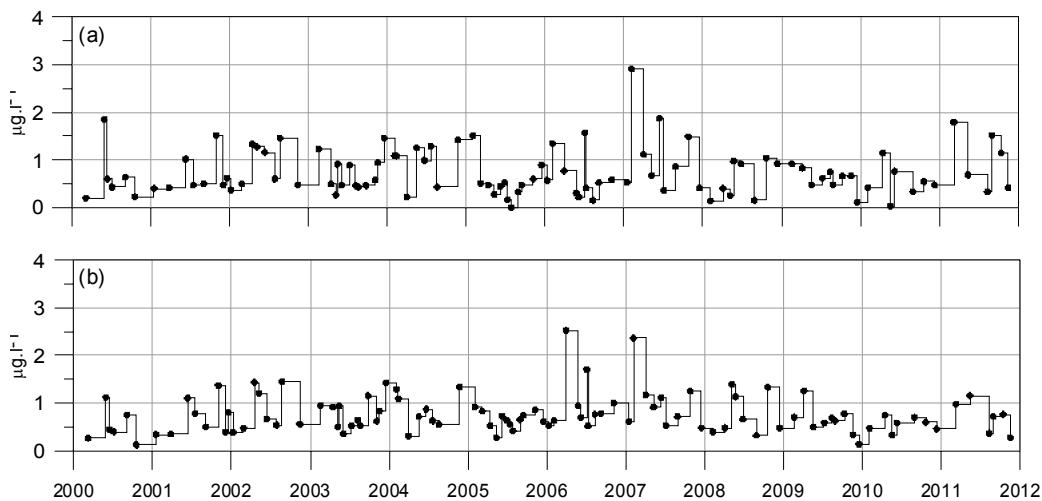


Figura 54. Datos de clorofila-a en la estación D0, n=103 (a) Valores *in situ* de la capa superficial (0-1 m); (b) Valores *in situ* promediados hasta 30 m.

Temperatura y salinidad en el radial D

Las estaciones D2 y D0 están integradas en la Red de Calidad (estaciones L-REF10 y L-OI20, respectivamente). Por ello, en éstas, además de clorofila-a se miden otras variables oceanográficas mediante lances de CTD (temperatura, salinidad, PAR, etc.), se registra la profundidad de visión del disco de Secchi y se recogen muestras de agua para el análisis de nutrientes, turbidez, etc.

En la Red de Calidad se realizan 4 muestreos al año, desde 2002. Por otra parte, algunas variables oceanográficas también se miden como parte de otros proyectos adicionales que abarcan más años y que incluyen a la estación D1. Las variables que presentan series más largas y de mayor frecuencia en el transecto costa-océano, además de la clorofila-a, son la temperatura y la salinidad. La información sobre variables ambientales (p.e. nutrientes y turbidez) es más reducida.

A continuación se presentan las series temporales de temperatura y salinidad que se han utilizado en los análisis estadísticos. En la estación D2 los perfiles verticales se han tratado para obtener una serie representativa de la superficie (0-1 m) (Figura 55) y otra de la columna de agua (media aritmética entre 0 y 100 m) (Figura 56). En las estaciones D1 (Figura 57) y D0 (Figura 58) sólo se han utilizado los valores de superficie.

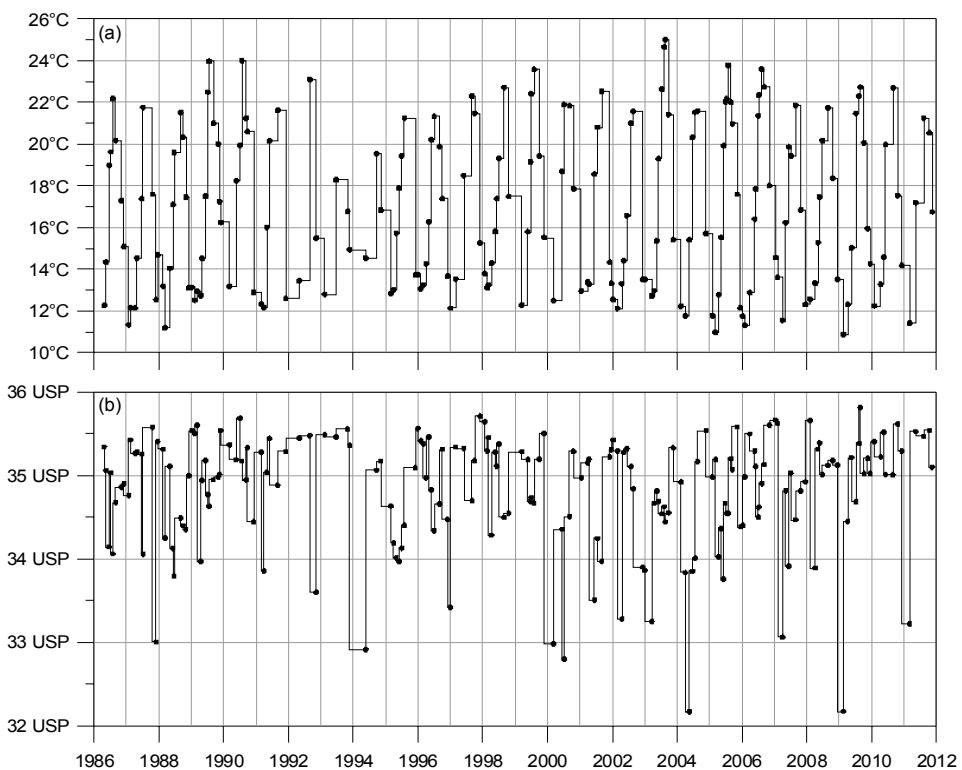


Figura 55. Datos superficiales en la estación D2, n=199 (a) temperatura; (b) salinidad.

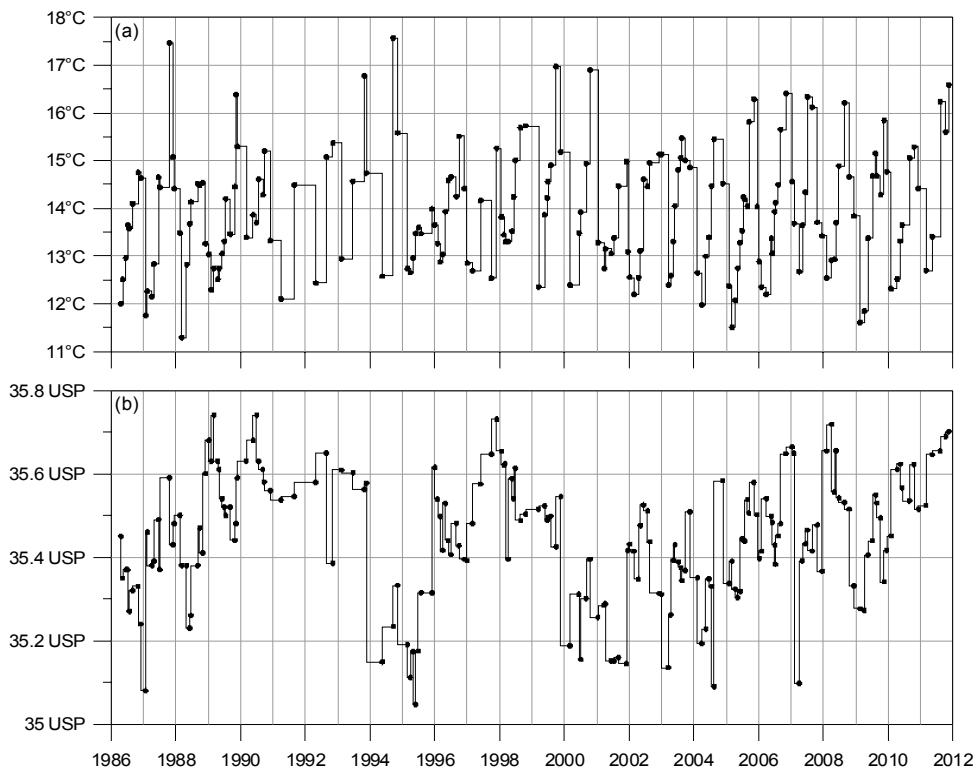


Figura 56. Datos promediados entre 0 y 100 m en la estación D2, n=194 (a) temperatura; (b) salinidad.

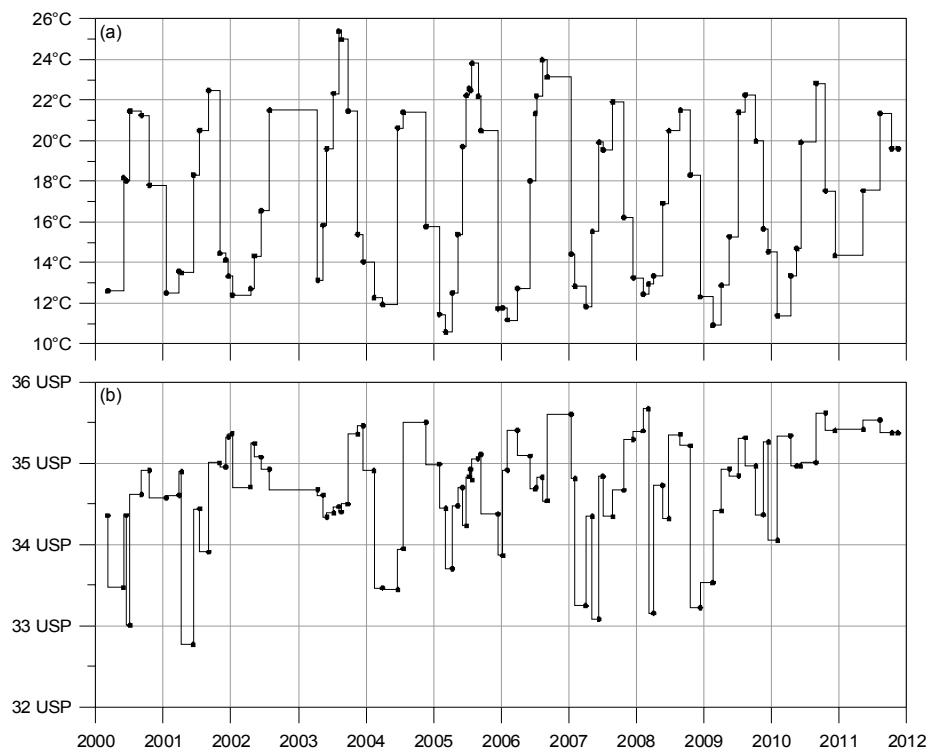


Figura 57. Datos superficiales en la estación D1, n=90 (a) temperatura; (b) salinidad.

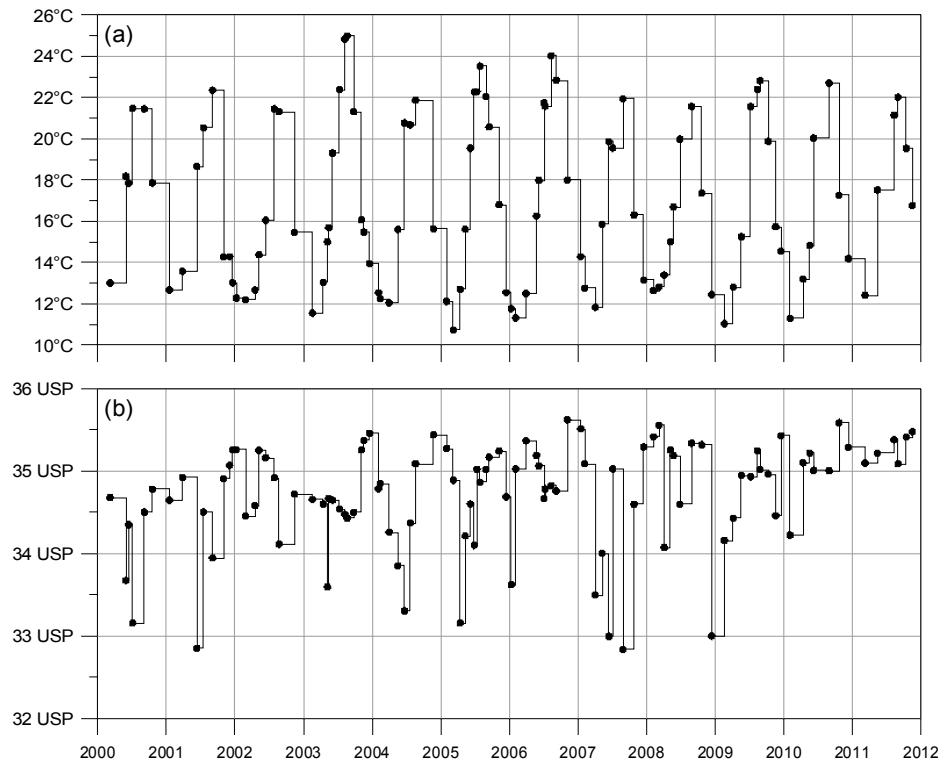


Figura 58. Datos superficiales en la estación D0, n=104 (a) temperatura; (b) salinidad

Estabilidad de la columna de agua en el radial D

En la Figura 59 se presentan los datos de la serie del balance afloramiento-hundimiento, calculado a partir de datos de viento tal y como se describe en la metodología.

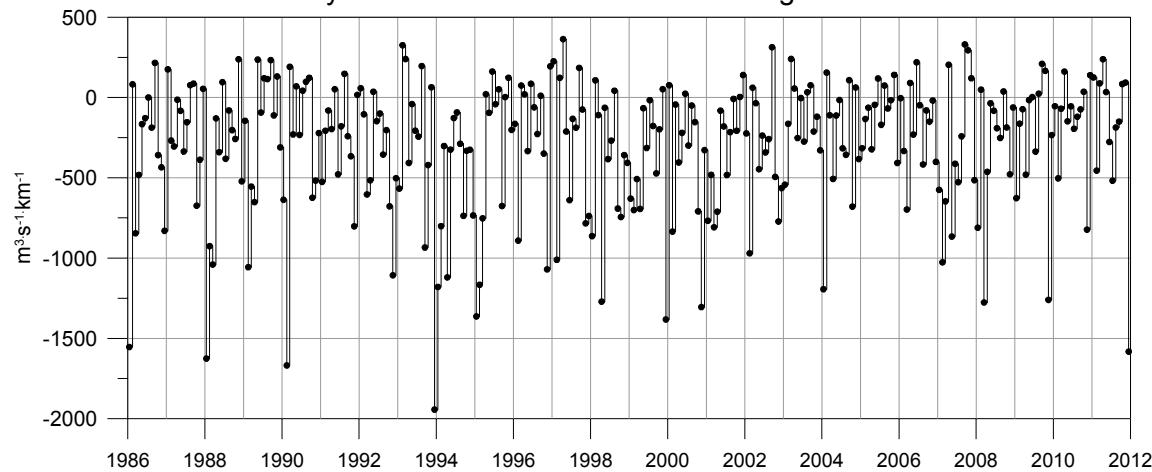


Figura 59. Datos del balance afloramiento-hundimiento en el entorno del radial D.

Nutrientes y condiciones ópticas en el radial D

La disponibilidad de nutrientes y luz son factores fundamentales que regulan la producción fitoplanctónica. Para la caracterización de estas variables se han recopilado los datos de nutrientes inorgánicos (N, P, Si), profundidad de visión del disco de Secchi y turbidez medida en superficie de las estaciones D2 y D0.

Además, también se han obtenido las series de profundidad de la capa fótica y coeficiente de extinción luminosa en la estación D2, calculados a partir de los perfiles verticales de PAR (véase metodología). No se ha empleado la D1 para caracterizar las condiciones de nutrientes y luz, ya que la medida de estas variables ha sido menos sistemática en esta estación, al no estar integrada en la Red de Calidad.

Se muestran a continuación los datos de nutrientes medidos en la Red de Calidad desde 2002 para la estación D2 (Figura 60) y D0 (Figura 61).

La profundidad de la capa fótica (Z_{eu}) y el coeficiente de extinción luminosa (k) ha sido posible calcularlos a partir del año 1998 en la estación D2 (Figura 62).

En cuanto a la profundidad de visión del disco de Secchi y la turbidez, las series de datos obtenidos en la Red de Calidad se muestran en la Figura 63 para la estación D2, y en la Figura 64 para la estación D0.

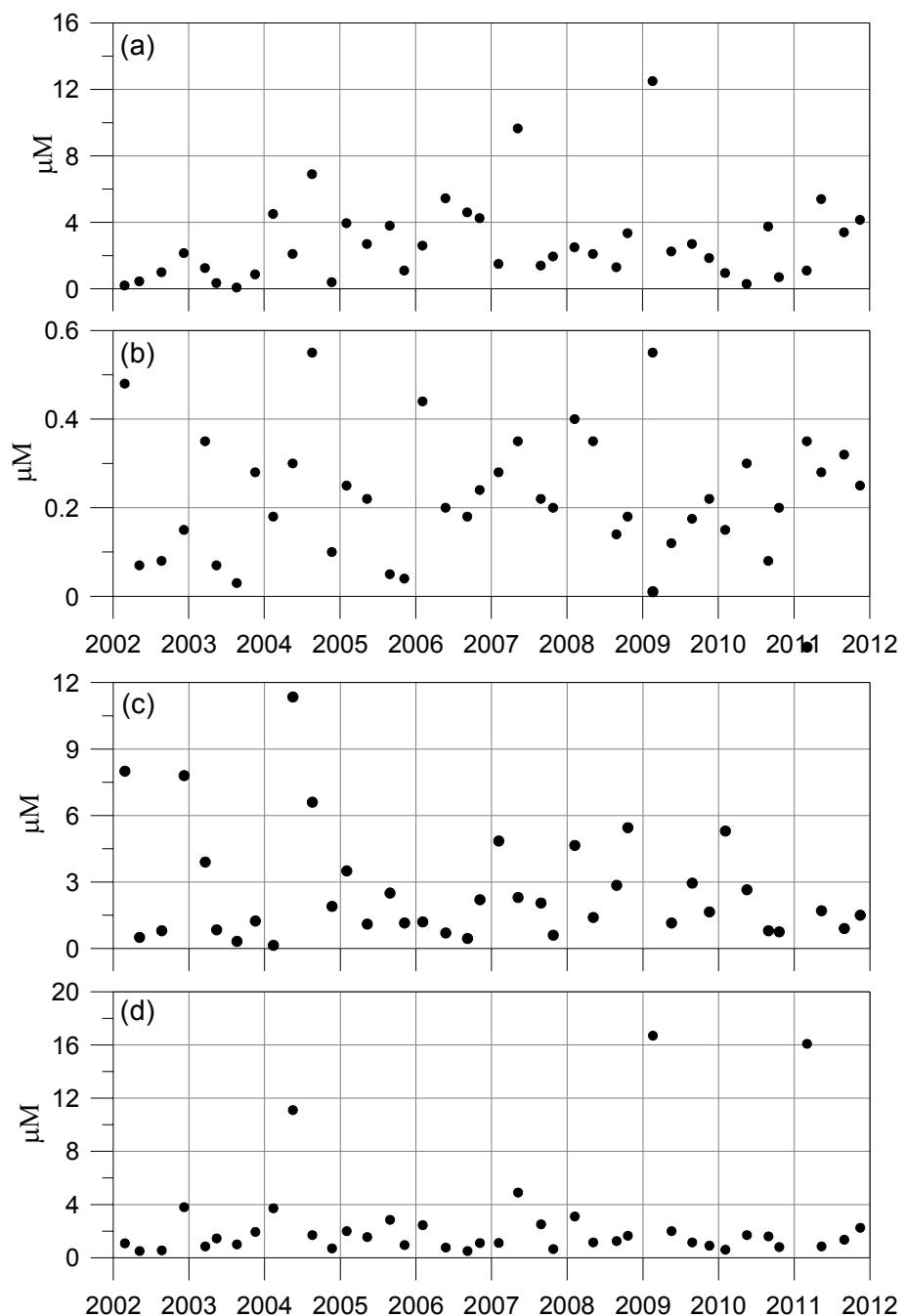


Figura 60. Concentraciones de (a) Amonio, (b) Fosfato, (c) Nitrato, y (d) Silicato medidas en superficie (0-1 m) en la estación D2 (L-REF10).

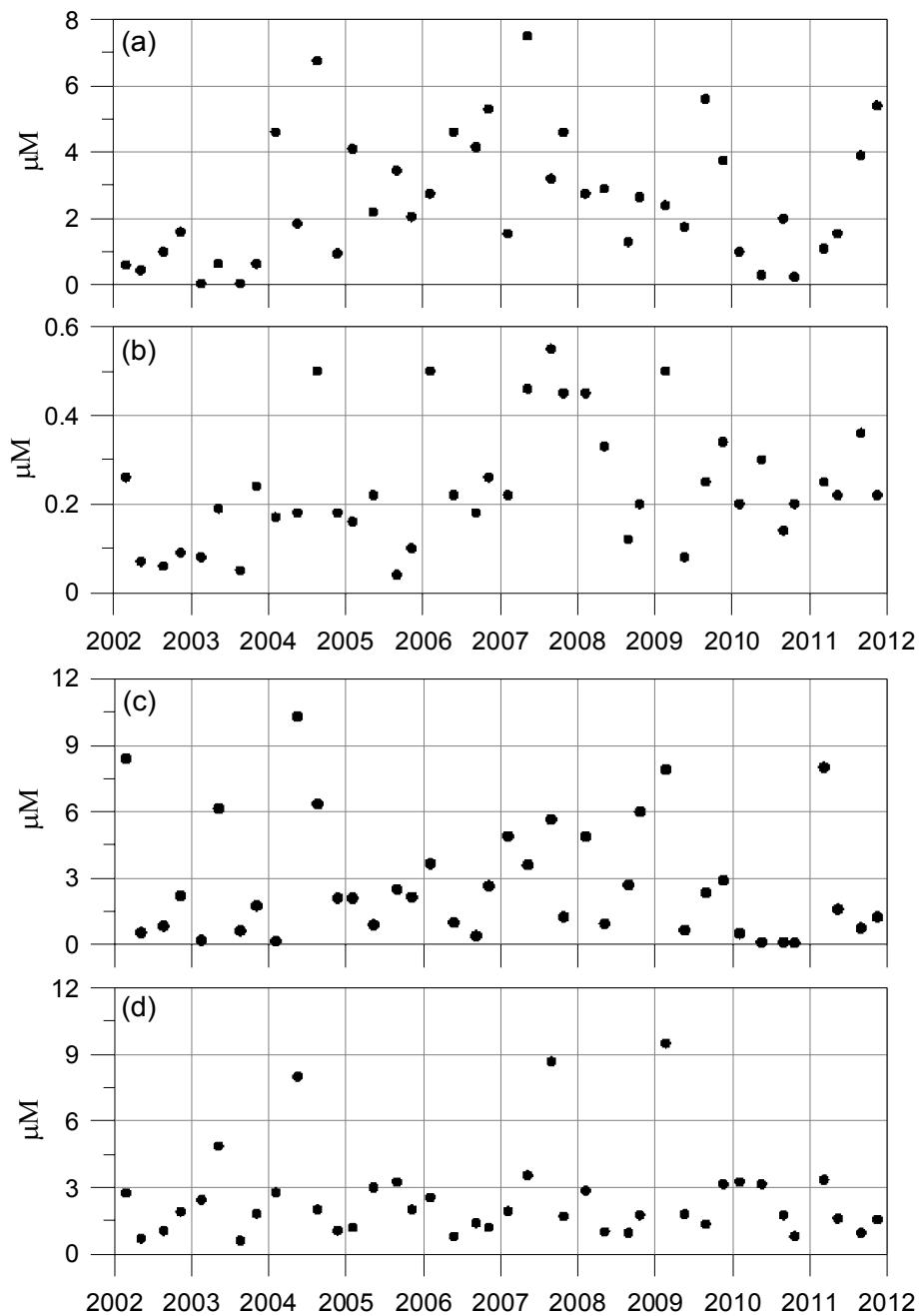


Figura 61. Concentraciones de (a) Amonio, (b) Fosfato, (c) Nitrato, y (d) Silicato medidas en superficie (0-1 m) en la estación D0 (L-OI20).

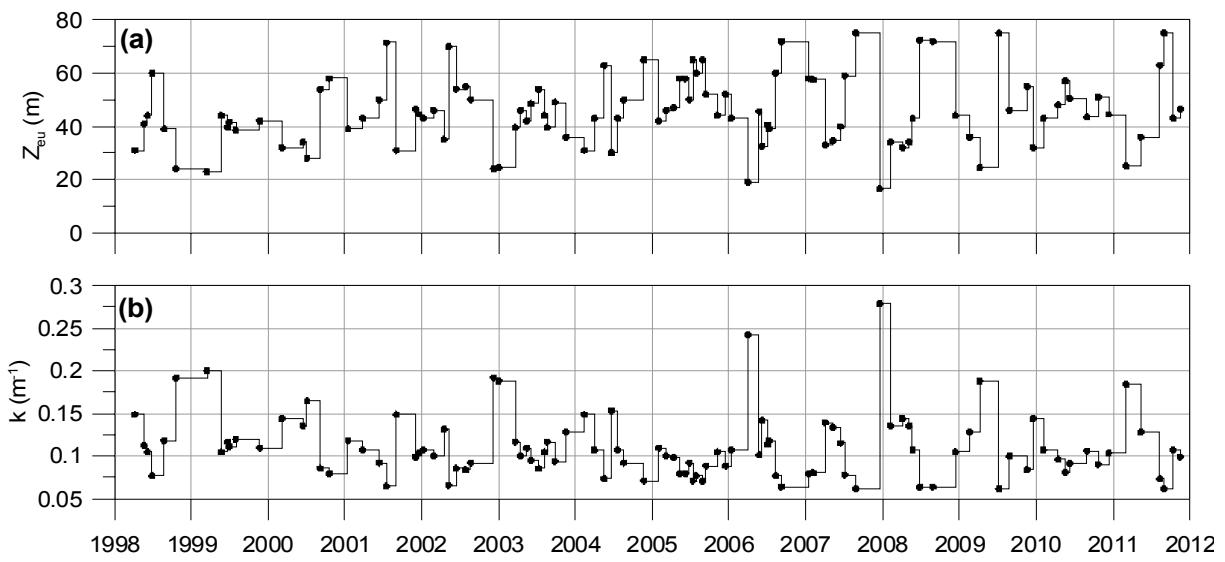


Figura 62. (a) Profundidad de la capa fótica y (b) Coeficiente de extinción luminosa en la estación D2.

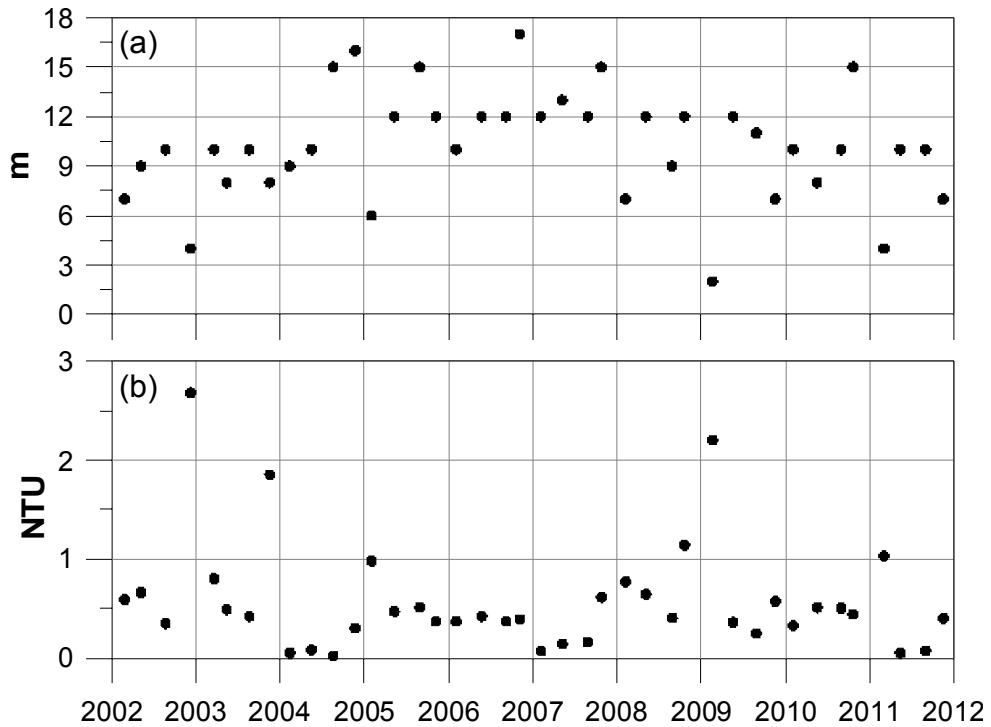


Figura 63. Datos de (a) disco de Secchi y (b) turbidez en superficie (0-1 m) en la estación D2 (L-REF10).

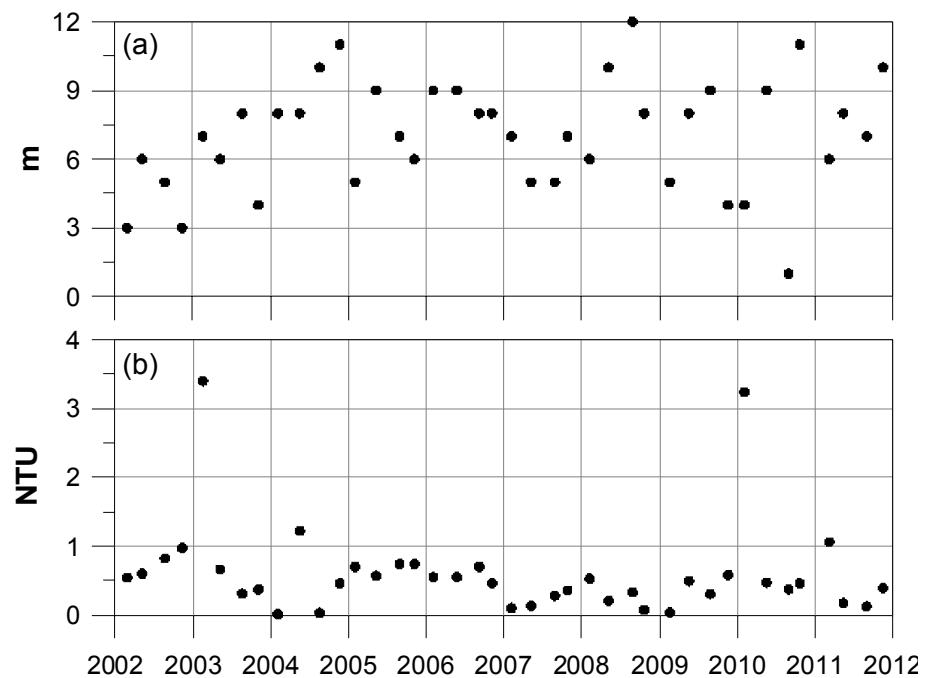


Figura 64. Datos de (a) disco de Secchi y (b) turbidez en superficie (0-1 m) en la estación D0 (L-OI20).

Datos meteorológicos del observatorio de Igeldo

En la Figura 65 pueden verse los datos de temperatura media mensual del aire (a), precipitación mensual acumulada (b), horas mensuales acumuladas de sol (c), evaporación mensual acumulada (d) y diferencia entre precipitación y evaporación mensual acumulada (e) del observatorio de Monte Igeldo de Donostia-San Sebastián (AEMET, 43° 18' N, 02° 02' W; a 252 m) en el periodo 1986-2010.

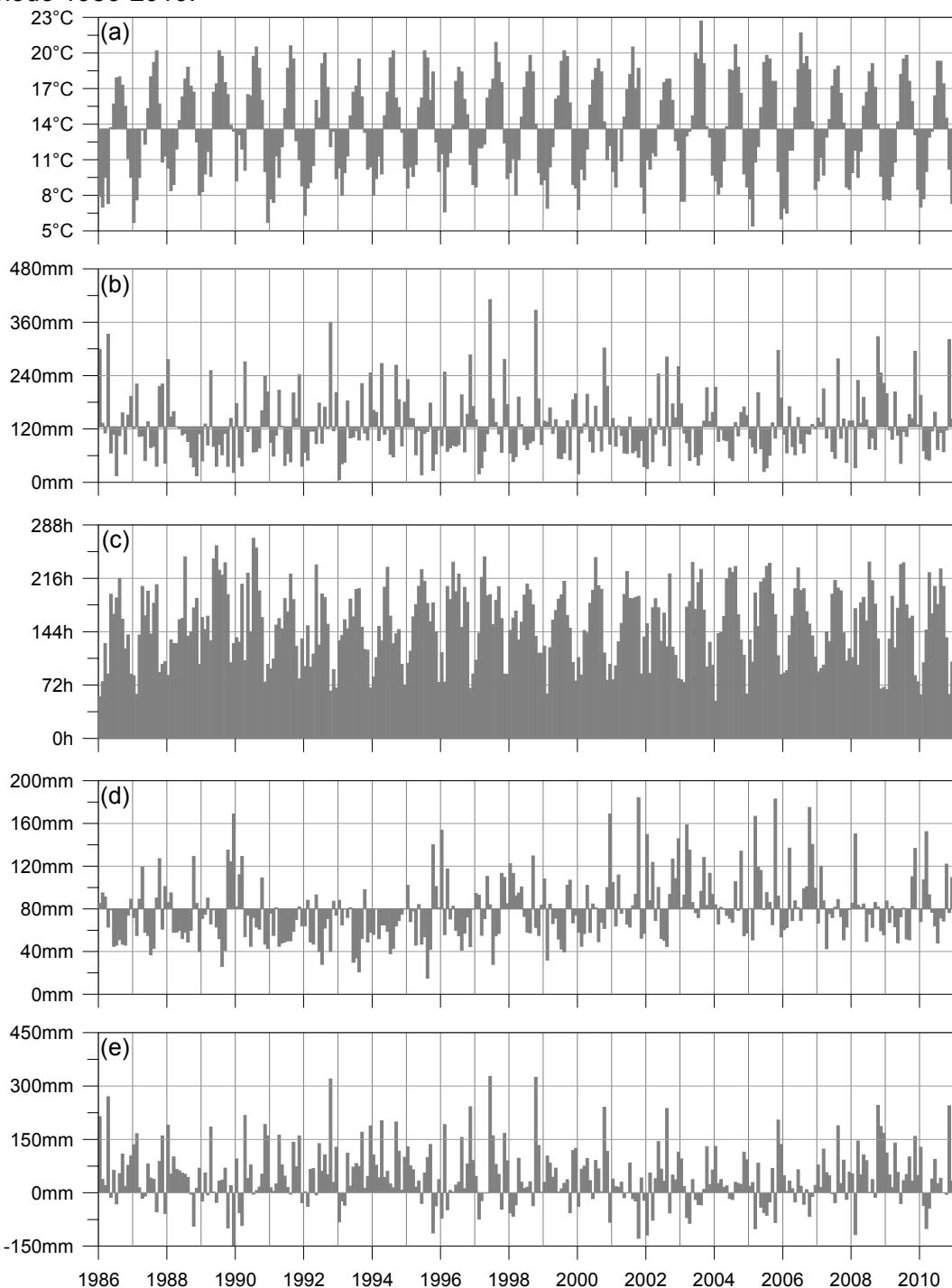


Figura 65. Datos del observatorio de Monte Igeldo. (a) Temperatura media mensual del aire, (b) precipitación mensual acumulada, (c) horas mensuales acumuladas de sol, (d) evaporación mensual acumulada y (e) diferencia entre precipitación y evaporación mensual acumulada.

Datos de temperatura superficial del mar

Se han empleado dos series de datos de temperatura superficial del mar durante el periodo 1986-2010. En la Figura 66 puede verse la serie de datos medios mensuales de temperatura superficial del mar del Aquarium de Donostia-San Sebastián (43° 19' N, 02° 00' W). La serie de datos de temperatura superficial del mar promedio del Atlántico norte, AMO (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/AMO/>) está representada en la Figura 67 (Smith y Reynolds, 2004).

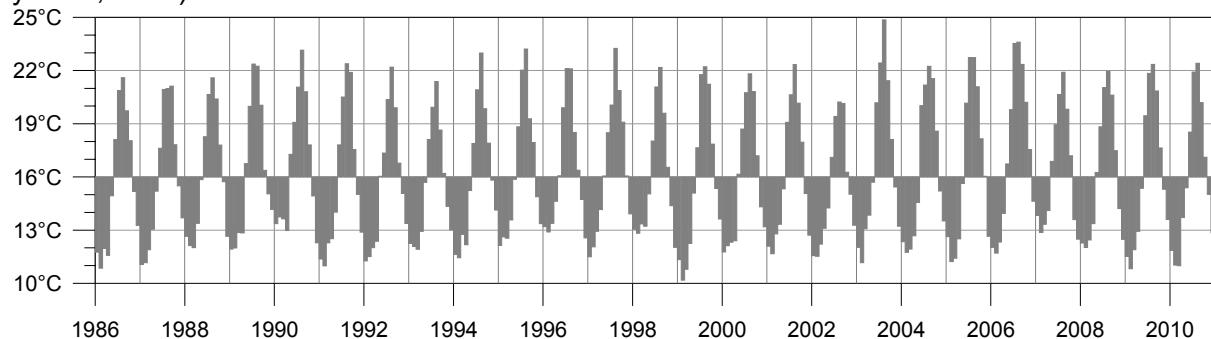


Figura 66. Media mensual de la temperatura superficial del mar (SST) del Aquarium (1986-2010).

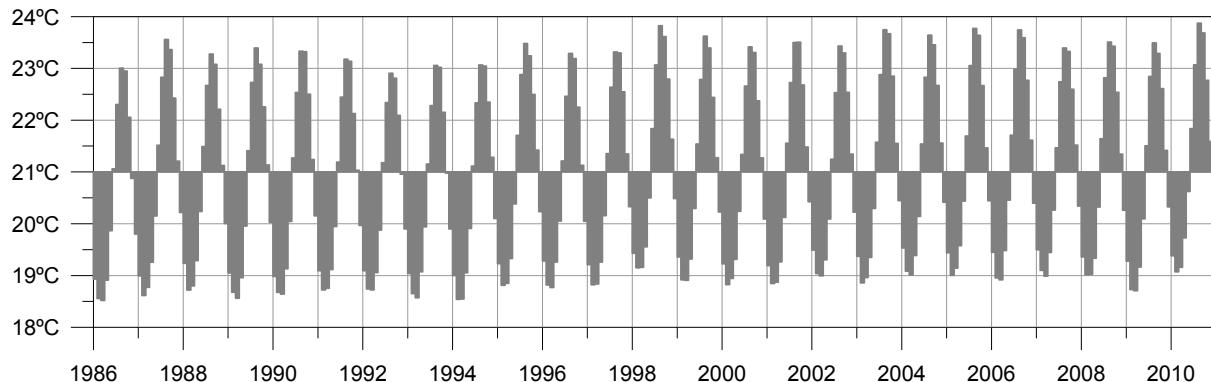


Figura 67. Media mensual de la SST de la serie AMO de la NOAA (1986-2010).

Caudales fluviales

Se dispone de los datos de caudal de las cuencas más importantes que vierten al extremo sudeste del golfo de Vizcaya, los ríos franceses Adour (HYDRO Database: <http://www.hydro.eaufrance.fr/>) y Gironde (Autoridad Portuaria de Burdeos). Además se dispone de datos de caudal medio diario del Bidasoa en el mismo periodo. Los caudales se representan en la Figura 68, en la imagen (a) está el caudal mensual del Adour, en la (b) el caudal medio mensual del Gironde y en la (c) el caudal diario del Bidasoa.

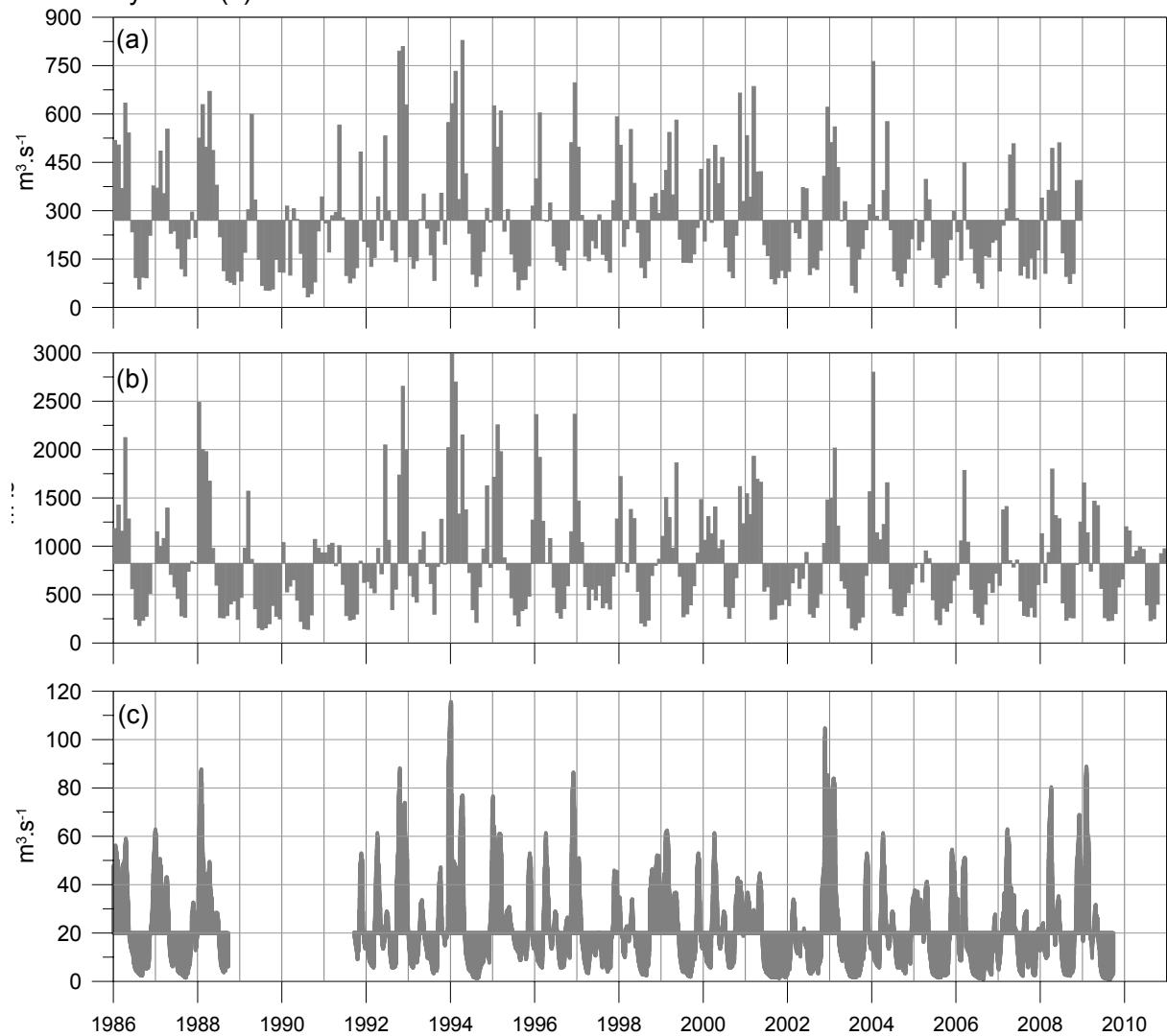


Figura 68. (a) Caudal medio mensual del Adour, (b) de La Gironde y (c) del Bidasoa.

ANEXO B – TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SERIES Y CASOS TEST

Técnicas de análisis de series

En los apartados siguientes se presenta brevemente una revisión de métodos matemáticos para análisis de series temporales largas. Por otra parte, se muestran algunos ejemplos de aplicación de los mismos a cuatro series sintéticas de datos.

Media móvil centrada y filtros Kolmogorov-Zurbenko

Según Zurbenko *et al.* (1996) y Yang y Zurbenko (2010), siendo $x(t)$, $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$ una serie temporal de datos. La media móvil centrada (MMC) de semiancho q se define como:

$$MMC^q(x) = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{i+j} \quad (1)$$

El filtro Kolmogorov-Zurbenko para la primera iteración coincide con la media móvil centrada:

$$KZ_q^1(x) = MMC^q(x) = y_i^1 = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q x_{i+j} \quad (2)$$

y, recursivamente, para la iteración k -ésima como:

$$KZ_q^k(x) = y_i^k = \frac{1}{2q+1} \sum_{j=-q}^q y_{i+j}^{k-1} \quad \text{para } k \geq 2 \quad (3)$$

El filtro adaptativo KZA define un ancho de ventana a izquierda $q_H(t)$ y a derecha $q_T(t)$ del siguiente modo:

$$z(t) = KZ_q^k[x(t)] \quad (4)$$

$$D(t) = |z(t+q) - z(t-q)| \quad (5)$$

$$D'(t) = D(t+1) - D(t) \quad (6)$$

$$f(t) = 1 - \frac{D(t)}{\max[D(t)]} \quad (7)$$

$$q_H(t) = \begin{cases} q & \text{si } D'(t) < 0 \\ q \cdot f(t) & \text{si } D'(t) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$q_T(t) = \begin{cases} q & \text{si } D'(t) > 0 \\ q \cdot f(t) & \text{si } D'(t) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$KZA_q^1(x) = y_i^1 = \frac{1}{q_H + q_T + 1} \sum_{j=-q}^q z_{i+j} \quad (10)$$

$$KZA_q^k(x) = y_i^k = \frac{1}{q_H + q_T + 1} \sum_{j=-q}^q y_{i+j}^{k-1} \quad (11)$$

Modelo de transición en rampa

El modelo de regresión en forma de rampa (Mudelsee, 2010) se describe matemáticamente del siguiente modo:

$$X_{rampa}(t) = \begin{cases} x_1 & \text{si } t \leq t_1 \\ x_1 + (t - t_1) \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} & \text{si } t_1 < t \leq t_2 \\ x_2 & \text{si } t > t_2 \end{cases} \quad (12)$$

El modelo depende de cuatro parámetros: t_1 , t_2 , x_1 y x_2 . Para el cálculo de los parámetros del modelo se minimiza la función:

$$Error(t_1, x_1, t_2, x_2) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{x(t_i) - x_{rampa}(t_i)}{S(t_i)} \right]^2 \quad (13)$$

Siendo $S(t_i)$ la variabilidad o incertidumbre asociada a cada dato $x(t_i)$, y n es el número de datos.

Fijando dos valores para t_1 y t_2 existe una expresión analítica para los parámetros x_1 y x_2 que minimizan la función (13) (Mudelsee, 2000). Un mecanismo poco sofisticado, de fuerza bruta, para resolver el problema consiste en repetir el procedimiento para todas las combinaciones de t_1 y t_2 . Eligiendo la que provea del valor mínimo a la función error se obtiene la solución óptima t_1 , t_2 , x_1 y x_2 .

Se ha programado una versión más sencilla del algoritmo en la cual la incertidumbre es un dato a priori de las medidas, por ejemplo, un valor constante. Si bien existen alternativas para la estimación de la incertidumbre intrínseca a los datos (Mudelsee, 2000) por el momento, no se ha avanzado en estos métodos.

Modelo de cambio brusco de tendencia (quiebro)

El modelo de regresión en forma de cambio brusco de tendencia (Mudelsee, 2010) se describe matemáticamente del siguiente modo:

$$X_{break}(t) = \begin{cases} x_1 + (t - t_1) \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} & \text{si } t \leq t_2 \\ x_2 + (t - t_2) \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} & \text{si } t > t_2 \end{cases} \quad (14)$$

El modelo depende de cuatro parámetros, x_1 , t_2 , x_2 y x_3 . Para el cálculo de los parámetros del modelo se minimiza la función:

$$Error(x_1, t_2, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{x(t_i) - x_{break}(t_i)}{S(t_i)} \right]^2 \quad (15)$$

Siendo $S(t_i)$ la variabilidad asociada a cada dato $x(t_i)$, y n es el número de datos.

Fijando el instante en que se produce el cambio de pendiente t_2 , existe una expresión analítica para obtener los valores de los otros tres parámetros que minimizan la función (15), (Mudelsee, 2000). Repitiendo el procedimiento para todas los diferentes valores de t_2 y, eligiendo la que provea del valor mínimo a la función error se obtiene la solución óptima x_1 , t_2 , x_2 y x_3 .

En este caso también se ha programado una versión más sencilla del algoritmo considerando la incertidumbre como un dato, que puede hacerse constante para todas las medidas.

Casos test

A continuación se muestran de forma resumida los casos test realizados al objeto de comparar las capacidades de las técnicas de análisis de series temporales presentadas (media móvil centrada, KZA, modelo en rampa y modelo en quiebro).

El primer caso test consiste en un cambio de tendencia lineal en una serie de datos con variación quincenal y mensual y un ruido aleatorio uniforme entre -1 y 1 de media nula (Figura 69, Anexo B).

El segundo caso consiste de nuevo en una serie con oscilación quincenal y mensual, un ruido aleatorio uniforme entre -1 y 1 y la suma de la variación en los niveles medios de los dos casos anteriores: quiebro y rampa (Figura 71, Anexo B).

El caso 3 consiste de nuevo en una serie con oscilación quincenal y mensual, un ruido aleatorio uniforme entre -1 y 1 y la suma de la variación en los niveles medios de los dos casos anteriores: quiebro y rampa (Figura 73, Anexo B).

Por último, el caso 4 (Figura 75, Anexo B) se obtiene a partir del caso 3 incorporando dos saltos bruscos del nivel medio.

Los resultados de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, *Root Mean Square Error*) de las comparaciones con los diferentes métodos están en la Tabla 9. Los resultados obtenidos muestran que a través los algoritmos paramétricos (modelo en rampa y modelo en quiebro) se obtiene el mejor ajuste siempre y cuando las series temporales presenten cambios acordes a la forma de variación que asumen sus formulaciones.

Tabla 9. Valores del RMSE entre la variación con el tiempo del valor medio y los resultados de las diferentes técnicas de análisis empleadas para cada uno de los casos test. MMC: Media Móvil Centrada; KZA: Filtro adaptativo Kolmogorov-Zurbenko.

RMSE	MMC (350)	KZA (350, 4)	Modelo rampa	Modelo quiebro
CASO 1	6,6·10-3	3,1·10-3	7,7·10-3	2·10-5
CASO 2	6,8·10-3	2,9·10-3	8·10-5	4,5·10-3
CASO 3	8,3·10-3	7,0·10-3	1,0·10-2	4,8·10-3
CASO 4	9·10-3	5·10-3	1,7·10-2	3,5·10-2

Por otra parte, la media móvil centrada (MMC) reproduce cualquiera de las líneas de tendencia consideradas (Tabla 9). Sin embargo, presenta el inconveniente de producir una pequeña oscilación en torno a la tendencia si el ancho de la ventana no es un múltiplo de las frecuencias de oscilación presentes en la serie original.

Por último, el KZA muestra los resultados más satisfactorios en cualquiera de los casos test presentados (Tabla 9). Respecto a MMC, presenta la ventaja de poder ajustar el tamaño de la ventana de acuerdo a la tasa de cambio del proceso. Respecto a los modelos de quiebro y rampa, parece más adecuado ya que no asume un modelo de variación que represente la variabilidad temporal del proceso.

Con el fin de poner de manifiesto las capacidades de las técnicas de análisis presentadas en el apartado 4.1 y el buen funcionamiento de los códigos numéricos de los algoritmos, a continuación se muestran los resultados obtenidos en los cuatro casos test realizados.

Caso 1

El primer caso (Figura 69) es una serie de datos horarios durante 2000 días, formada por un número aleatorio uniformemente distribuido entre -1 y 1 (a), una variación lineal con un quiebro (b) y (c) variabilidad mensual y quincenal sinusoidal.

En la Figura 70 se muestran los resultados de las diferentes técnicas de análisis de la serie de datos graficada en la imagen (d) de la Figura 69. La variación de los valores medios a lo largo del tiempo se ha representado en color negro y los resultados de las técnicas de análisis en línea de color rojo.

En la Figura 70a puede verse el resultado de la media móvil de semiancho de ventana 350 datos, en la imagen (b) el resultado del filtro KZA con un semiancho de 350 datos y 4 iteraciones. En la imagen (c) se muestra el resultado del ajuste óptimo al modelo de transición en rampa y en la imagen (d) el resultado del modelo de cambio de tendencia.

Se observa que la media móvil (Figura 70a) sigue la línea de tendencia pero, que produce una pequeña oscilación en torno a ella debido en este caso a que el ancho de la ventana no es un múltiplo de las frecuencias de oscilación presentes en la serie original (15 y 30 días, 360 datos y 720 datos horarios, respectivamente), este fenómeno se denomina en el argot *aliasing*. En el caso del KZA (Figura 70b) el resultado sigue la línea de tendencia quebrada sin presentar *aliasing*.

El resultado del modelo paramétrico de rampa (Figura 70c) ajusta a un valor uniforme intermedio la primera fase de descenso y ajusta casi exactamente la segunda fase de ascenso del valor medio, eliminando la última fase de nivel uniforme haciendo ya que el óptimo que se obtiene corresponde a t_2 igual al último valor de la serie (véase la fórmula 12). El modelo de cambio de tendencia reproduce de forma exacta la variación del valor medio a lo largo del tiempo (Figura 70d) ya que su forma coincide con la parametrizada en la formulación.

Para cuantificar la bondad de los ajustes se calcula la raíz del error cuadrático medio (RECM) entre la variación de los valores medios de la serie y los resultados de los análisis. Los resultados obtenidos para el caso 1 se encuentran en la Tabla 9. Salvo el modelo de quiebro, que reproduce casi exactamente la variabilidad introducida, el mejor resultado es el del KZA.

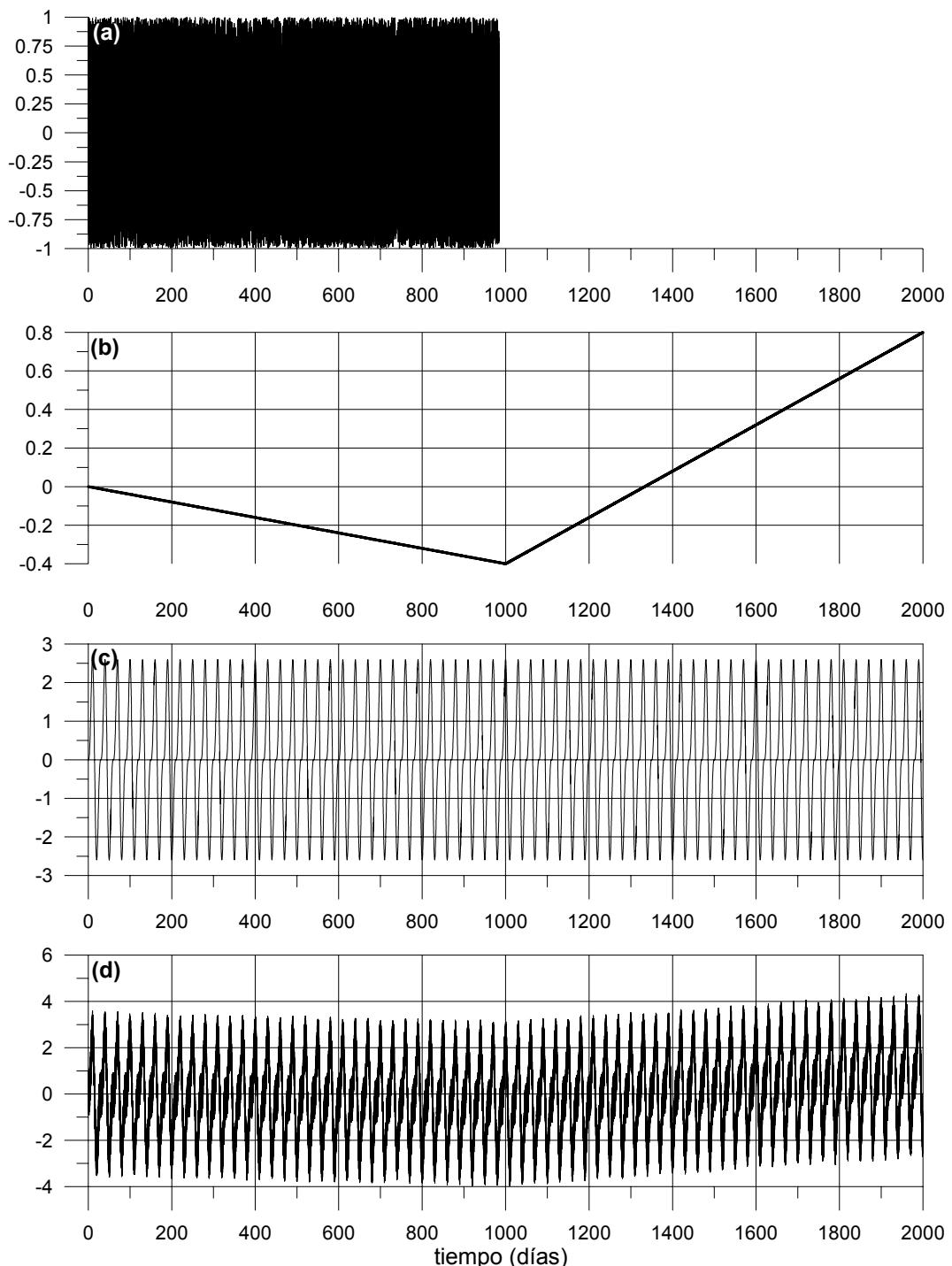


Figura 69. (a) Número aleatorio uniforme entre [-1,1]. (b) Línea quebrada de tendencia lineal en dos tramos. (c) Variabilidad mensual y quincenal. (d) Suma de (a), (b), y (c).

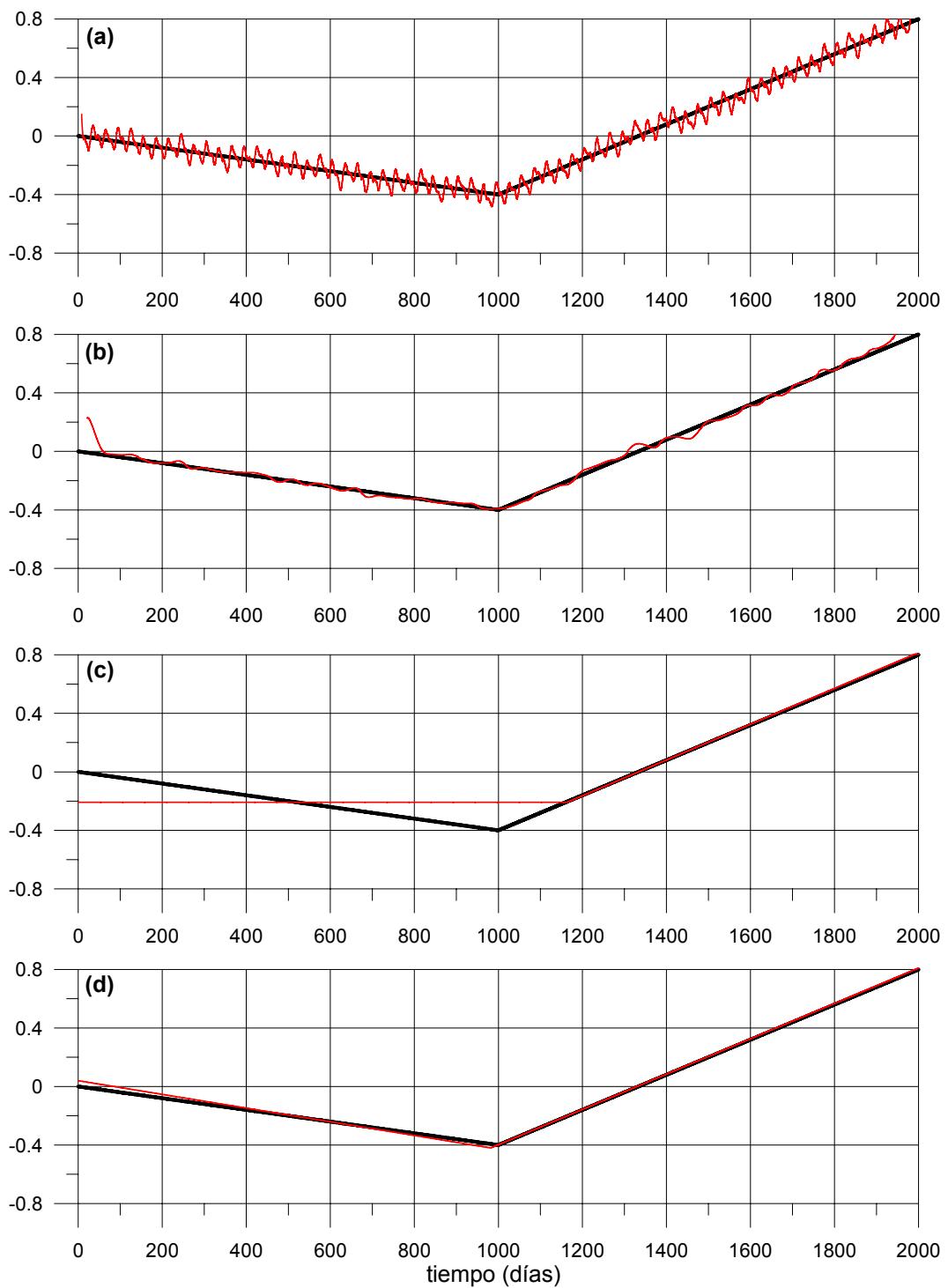


Figura 70. En negro, la variación de los valores medios del caso 1. En rojo: (a) media móvil de semiancho de banda 350 datos, (b) filtro KZA de semiancho de banda 350 datos y 4 iteraciones, (c) ajuste óptimo al modelo de transición en rampa y (d) ajuste óptimo al modelo de cambio de tendencia.

Caso 2

El segundo caso (Figura 71) es igual que el anterior pero, con una variación de los niveles medios en forma de rampa que une dos períodos de niveles medios uniformes (imagen b).

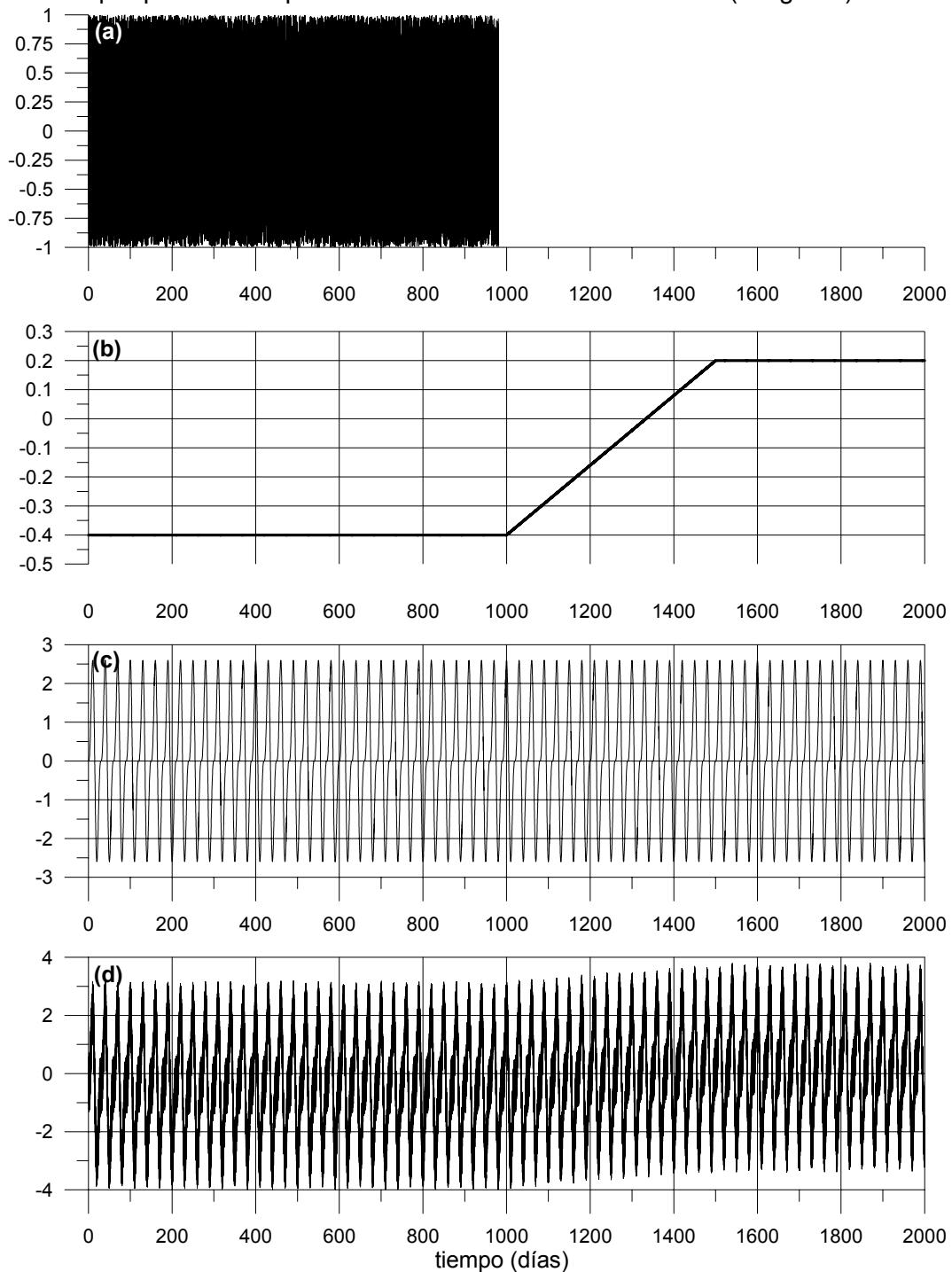


Figura 71. (a) Número aleatorio uniforme entre [-1,1]. (b) Línea de rampa de variación entre dos niveles uniformes. (c) Variabilidad mensual y quincenal. (d) Suma de (a), (b), y (c).

En la Figura 72 se muestran los resultados obtenidos mediante las 4 técnicas de análisis. En imagen (a) se muestra la MMC de 350 días de semiancho de banda y en (b) el resultado del KZA de 350 días y 4 iteraciones. En la Figura 72c el resultado del modelo paramétrico de rampa y en (d) el resultado del modelo de quiebro.

Entre los modelos un paramétricos, de nuevo se observa *aliasing* en la MMC, si bien el ajuste obtenido con respecto a la tendencia artificial introducida en los datos, tanto con la MMC, como con el KZA es bueno. El modelo de rampa, al ser un modelo paramétrico que es exactamente igual a la variación introducida en los datos da lugar a los mejores resultados mientras que, el modelo de quiebro se ajusta a lo mejor posible con un periodo de pequeña pendiente inicial que encaja bastante bien con el modelo de rampa y una fase de ascenso posterior.

Los resultados de la RECM de las comparaciones con los diferentes métodos están en la Tabla 9. El mejor ajuste se obtiene con el filtro KZA, exceptuando la solución exacta que se obtiene con el modelo de rampa.

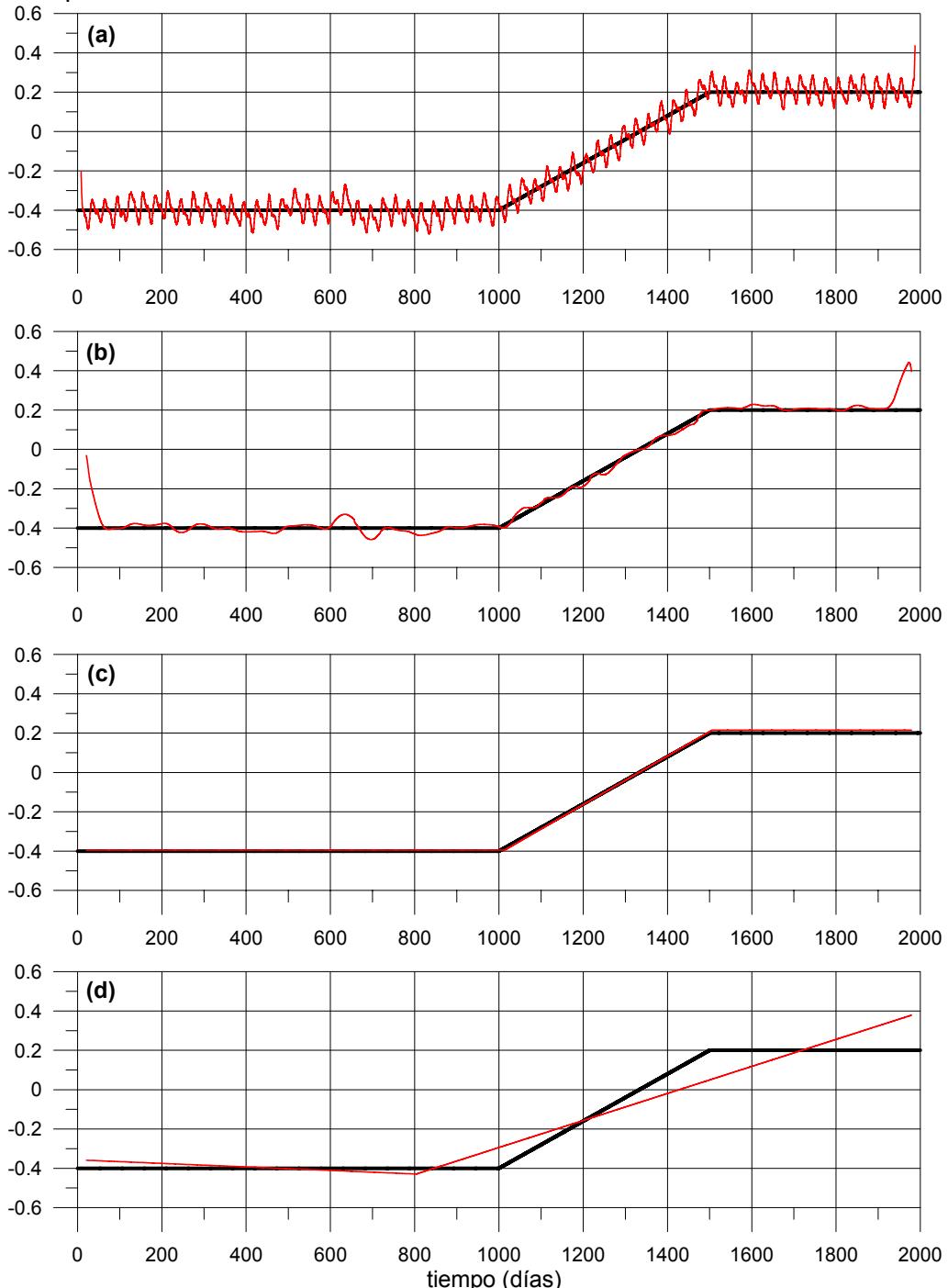


Figura 72. En negro, la variación de los valores medios del caso 2. En rojo: (a) media móvil de semiancho de banda 350 datos, (b) filtro KZA de semiancho de banda 350 datos y 4 iteraciones, (c) ajuste óptimo al modelo de transición en rampa y (d) ajuste óptimo al modelo de cambio de tendencia.

Caso 3

En tercer caso es la suma de los dos casos anteriores y puede verse en la Figura 73. La variación de los niveles medios es una línea quebrada, descendente inicialmente, ascendente a partir de 1000 días, con una disminución de la pendiente a partir de 1500 días (imagen b de la Figura 73).

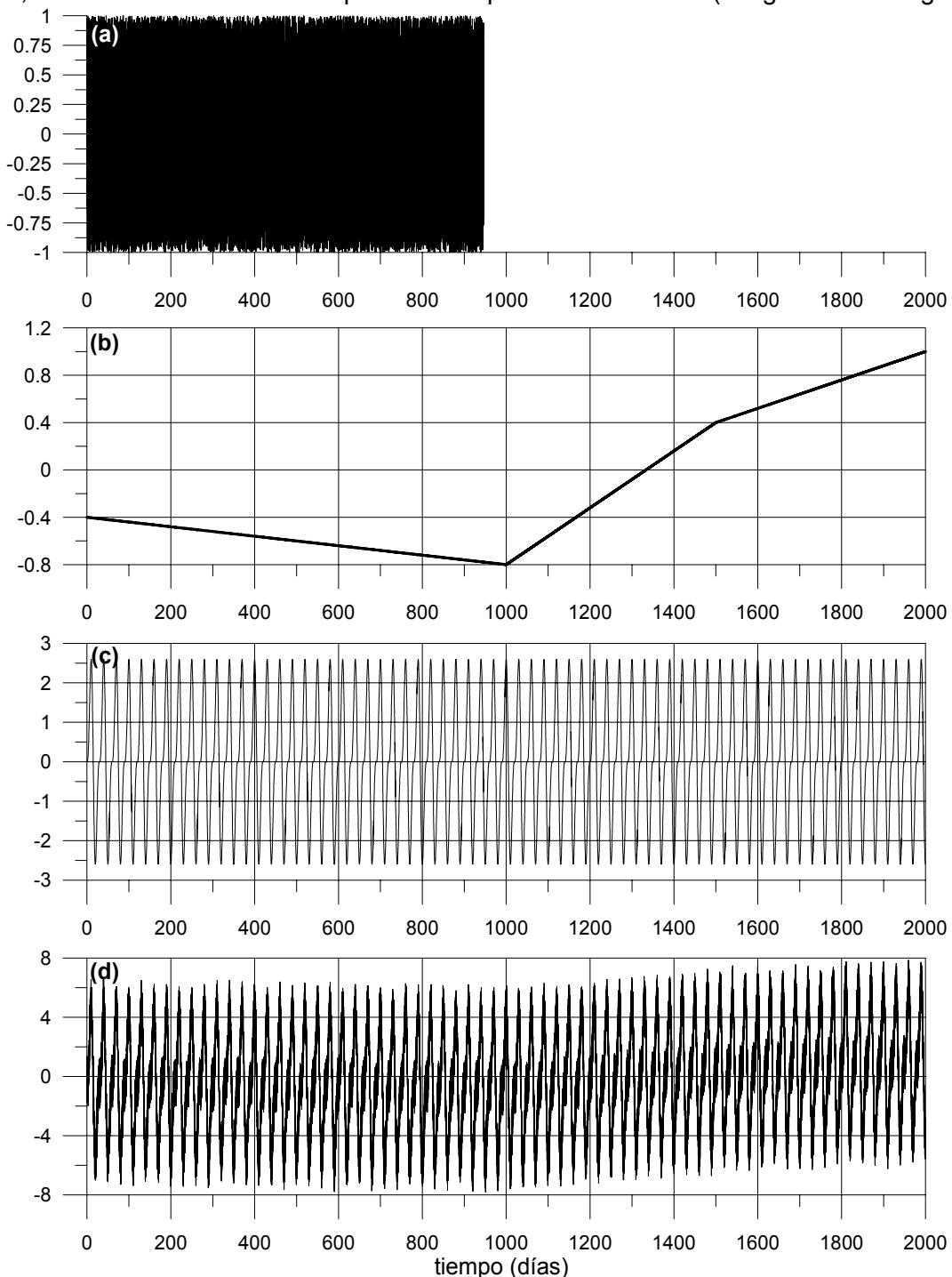


Figura 73. (a) Número aleatorio uniforme entre [-1,1]. (b) Línea de rampa de variación entre dos niveles uniformes más línea quebrada de tendencia lineal en dos tramos. (c) Variabilidad mensual y quincenal. (d) Suma de (a), (b), y (c).

En la Figura 74 está el resultado de los algoritmos no paramétricos: en la imagen (a) la MMC de semiancho 350 y en (b) el KZA de $q=350$ y 4 iteraciones y en (c) y (d), los resultados de los dos modelos paramétricos (quebro y rampa).

Los resultados de la RECM de las comparaciones de los resultados con los diferentes métodos de análisis y la tendencia introducida están en la Tabla 9. En este caso el peor resultado es el del modelo de rampa siendo bastante parejos. Se observa el *aliasing* en el caso de la media móvil centrada y un ajuste bastante bueno en el caso de los resultados del filtro KZA.

En el caso de los modelos paramétricos el resultado es algo mejor en el caso del modelo de quiebro ya que reproduce mejor la fase inicial de descenso que en el caso de rampa es uniforme. El modelo de rampa reduce prácticamente hasta que se hace inapreciable la última fase de su esquema de valor final uniforme.

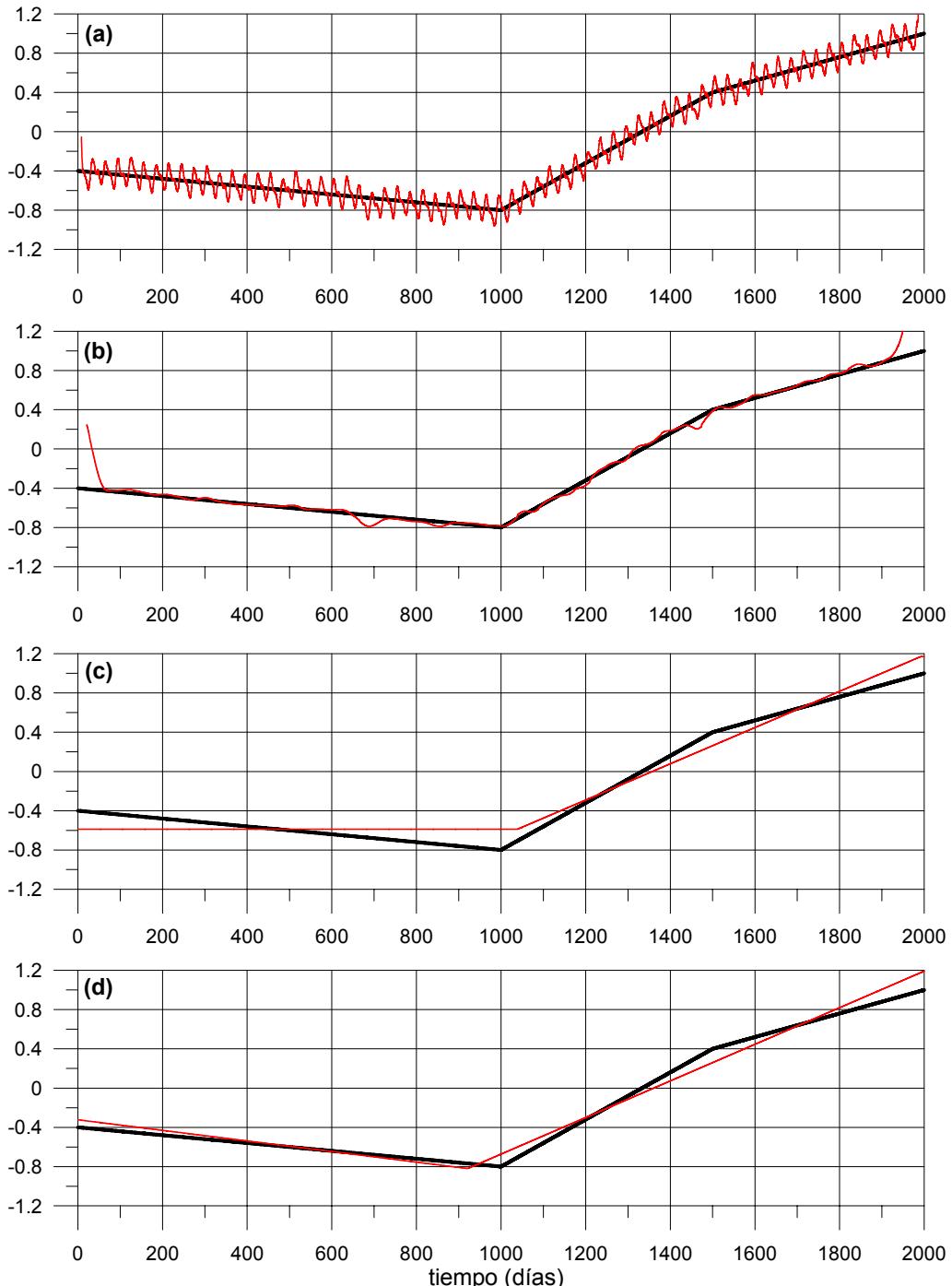


Figura 74. En negro, la variación de los valores medios del caso 3. En rojo: (a) media móvil de semiancho de banda 350 datos, (b) filtro KZA de semiancho de banda 350 datos y 4 iteraciones, (c) ajuste óptimo al modelo de transición en rampa y (d) ajuste óptimo al modelo de cambio de tendencia.

Caso 4

El último caso (Figura 75) se obtiene a partir del caso 3 incorporando dos saltos bruscos, uno en $t=500$ días ascendente y otro en 1500 días descendente.

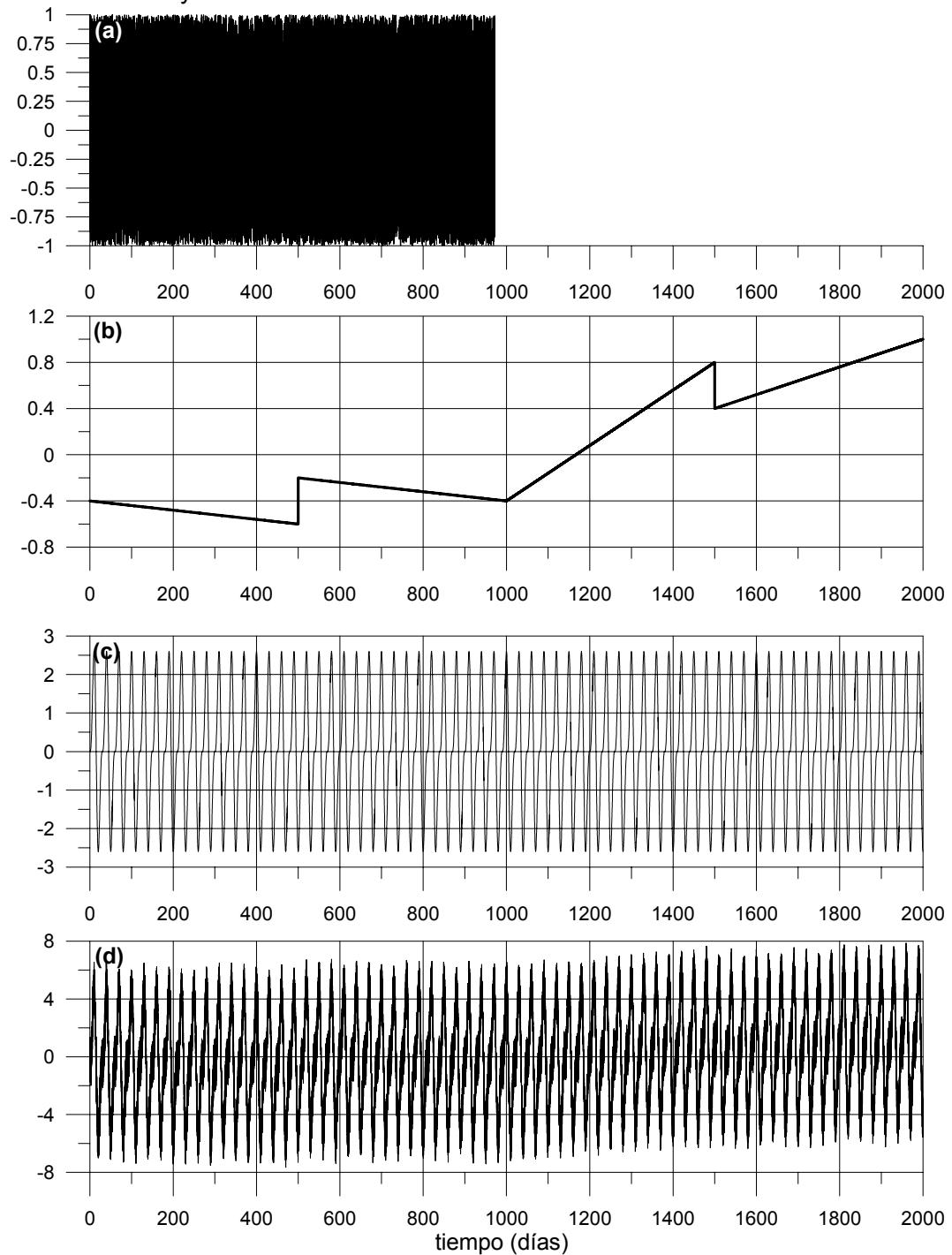


Figura 75. (a) Número aleatorio uniforme entre $[-1,1]$. (b) Línea de variación de los valores medios con dos saltos. (c) Variabilidad mensual y quincenal. (d) Suma de (a), (b), y (c).

En la Figura 76 puede verse el resultado de los algoritmos no paramétricos: en la imagen (a) la MMC de semiancho 350 y en (b) el resultado del filtro KZA de semiancho 350 y 4 iteraciones y en (c) y (d), los resultados de los dos modelos paramétricos (quiebro y rampa).

Puede observarse que el algoritmo KZA (Figura 76a) reproduce los períodos de variación lineal, localiza los saltos introducidos de forma bastante eficaz y no presenta el fenómeno del *aliasing* que, por el contrario, sí que se presenta empleando medias móviles centradas.

La comparación en forma de la RECM entre la variación artificial de los valores medios y los resultados de los cuatro métodos empleados se puede ver en la Tabla 9, observándose que la mejor correspondencia es con el KZA. Los algoritmos paramétricos tratan de obtener el mejor ajuste a la forma de variación que asumen sus formulaciones, por lo que no pueden reproducir los cambios bruscos de valores medios presentes en la serie. En el caso del modelo de quiebro, el resultado obtenido (Figura 76c) da lugar a una primera fase de fuerte variación que no existe realmente en la serie y el modelo de rampa se ajusta algo mejor reduciendo a la mínima expresión la fase final de valor uniforme.

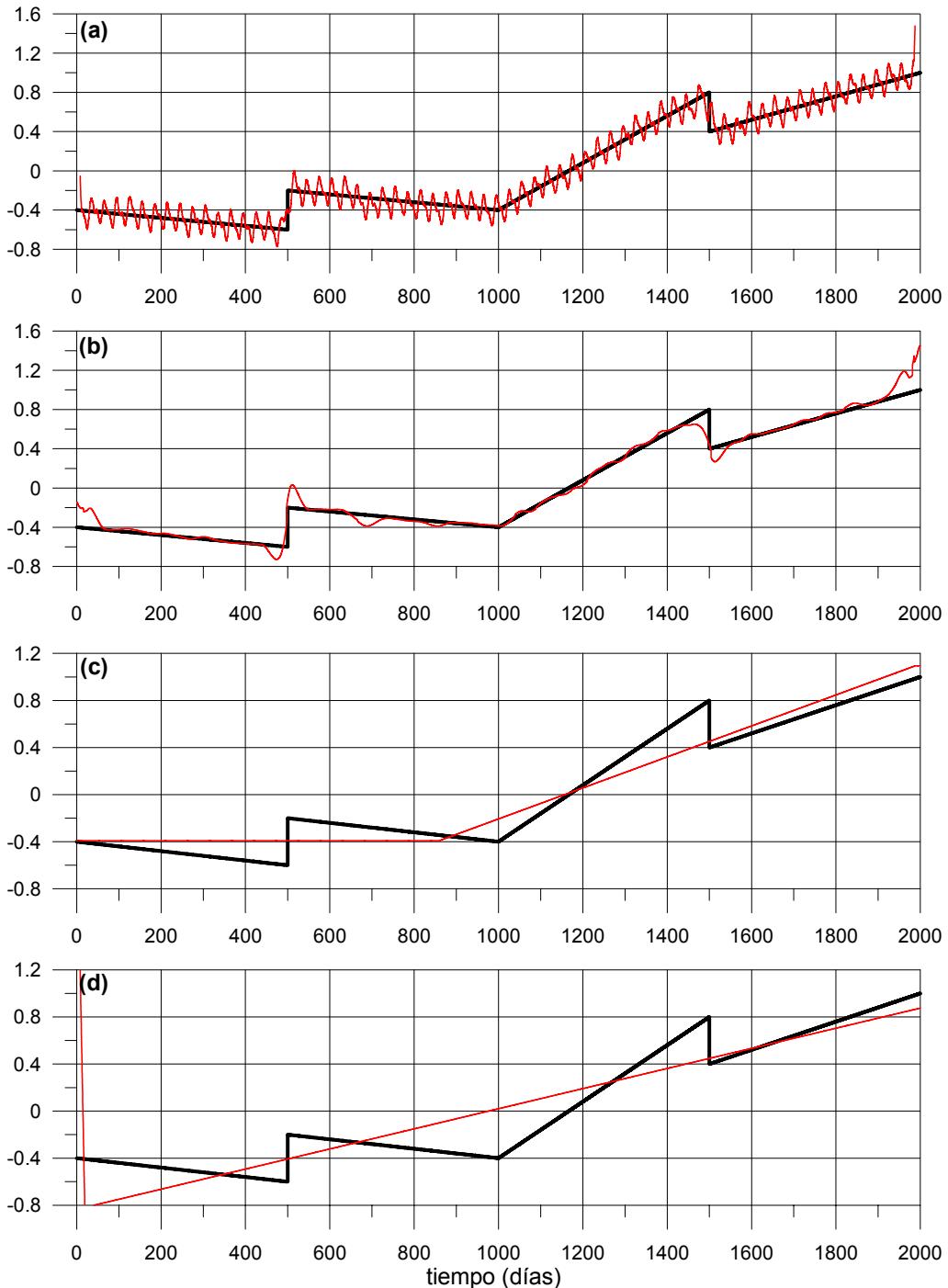


Figura 76. En negro, la variación de los valores medios del caso 4. En rojo: (a) media móvil de semiancho de banda 350 datos, (b) filtro KZA de semiancho de banda 350 datos y 4 iteraciones, (c) ajuste óptimo al modelo de transición en rampa y (d) ajuste óptimo al modelo de cambio de tendencia.

ANEXO C – CONDICIONES DE REFERENCIA DE LA CLOROFILA

En septiembre de 2012, el *Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre* (JRC), de la Comisión Europea, envió al Ministerio Español de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente un documento titulado “NEA GIG Phytoplankton. Summary of JRC IC evaluation” (Autor: Wendy Bonne). Este documento evaluaba la idoneidad de los resultados de la 1^a fase de la intercalibración, con el fin de decidir si dichos resultados debían ser vinculantes en la futura decisión de la Comisión respecto a los métodos de evaluación empleados por los distintos Estados Miembros en relación con la DMA.

Dicho documento incluía un ejemplo para el tipo 1/26A, donde se observaban algunos problemas en la comparabilidad de los métodos de evaluación de la calidad biológica basados en el fitoplancton, en concreto con las métricas que emplean concentración de clorofila-a. El JRC formulaba varias recomendaciones para mejorar la comparabilidad entre los métodos de distintos Estados Miembros. Entre estas recomendaciones se incluía una propuesta para reducir la condición de referencia (RC) y los umbrales entre las clases de estado en el Cantábrico oriental.

Los ajustes propuestos por el JRC para el Cantábrico oriental afectarían, por lo tanto, a las Comunidades Autónomas del País Vasco y de Cantabria. Los límites acordados durante la 1^a fase de la intercalibración, según el JRC, tendrían que hacerse mucho más exigentes, dividiéndose aproximadamente por 3 (Tabla 10).

Después de estudiar la propuesta del JRC, los expertos implicados en la intercalibración del fitoplancton en las Comunidades Autónomas del País Vasco y Cantabria vieron apropiado hacer más exigentes la RC y los límites entre clases de estado para la clorofila. No obstante, indicaron que los valores deberían ser ligeramente superiores a los recomendados por el JRC. Esta última propuesta quedó recogida en un informe y fue positivamente valorada en la reunión de ECOSTAT del 18-19 de octubre de 2012 (Tabla 10).

Tabla 10. Métrica basada en la clorofila-a (percentil 90) con los valores de la condición de referencia y los límites entre clases de estado en el Cantábrico oriental, tipo NEA 1/26A.

	Intercalibración 1 ^a Fase ($\mu\text{g/l}$)	Propuesta JRC Sep 2012 ($\mu\text{g/l}$)	Acuerdo final Oct 2012 ($\mu\text{g/l}$)	EQR
RC	2,33	0,8	1,0	1,00
MB/B	3,5	1,2	1,5	0,67
B/A	7,0	2,4	3,0	0,33

RC (Condición de Referencia); MB/B (Muy Bueno/Bueno); B/A (Bueno/Aceptable)

Los nuevos valores acordados para la RC ($1,0 \mu\text{g l}^{-1}$) y para los umbrales entre clases de estado (Muy bueno/Bueno= $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$; Bueno/Aceptable= $3,0 \mu\text{g l}^{-1}$) se basan principalmente en los resultados obtenidos con una serie de datos de clorofila-a de larga duración (>10 años) procedente de la zona offshore (estación L-REF10 ó D2). Además, se ha comprobado que estos umbrales son adecuados para la clasificación del estado de calidad biológica del fitoplancton, mediante su aplicación a los datos de las masas de agua costeras. A continuación se describe la justificación efectuada para proponer dichos valores.

Estaciones de referencia en el Cantábrico Oriental

Se han utilizado series de datos de clorofila-a de zonas consideradas con muy baja influencia antropogénica (es decir, cercanas a las condiciones de referencia). Siguiendo un enfoque similar al de la 1ª fase de la intercalibración en España, se han utilizado las estaciones situadas en alta mar (sobre profundidad ~100 m) y por lo tanto, alejadas de las principales fuentes de contaminación en tierra (8-13 km) (Careletti and Heiskanen, 2009).

La estación denominada L-REF10 ó D2 (43° 27' N, 01° 55' W), se encuentra a 13 km de la costa de Pasaia (Gipuzkoa). Esta estación recibe ocasionalmente aportes fluviales procedentes de las cuencas hidrográficas del sureste del golfo de Vizcaya, destacando la del Adour (Francia). No obstante, el agua de origen continental representa en promedio anual sólo el 2% de las aguas superficiales en esta zona (Revilla *et al.*, 2010), lo que asegura que la influencia humana es mínima.

Desde 1993, la concentración de clorofila-a se mide en esta estación utilizando una metodología similar a la empleada en las masas de agua costeras (es decir, fluorescencia *in situ* con CTD, a 1 m de profundidad). Otras dos estaciones oceánicas se monitorizan frente a la costa de la CAPV, desde 2006: la estación L-REF20 (43° 24'N, 02° 18' W) y la estación L-REF30 (43° 30'N, 02° 48' W). Éstas están situadas a 11 y 8 km, respectivamente, de la línea de costa.

En la estación L-REF10, la métrica de la clorofila (percentil 90 de los datos de 6 años) aplicada a lo largo del tiempo, desde 1993, da lugar a 14 casos (Figura 77a, b). El valor medio de la métrica considerando estos 14 periodos es $1,12 \mu\text{g l}^{-1}$. Los límites superior e inferior (95% confianza, *t*-student) son 0,79 y $1,44 \mu\text{g l}^{-1}$, respectivamente.

Si los límites propuestos por el JRC se aplicaran (Muy bueno/Bueno= $1,2 \mu\text{g l}^{-1}$; Bueno/Aceptable= $2,4 \mu\text{g l}^{-1}$), el estado se clasificaría en unas ocasiones como “Muy bueno” y en otras como “Bueno” a lo largo de la serie temporal (Figura 77a). Esta variación en el estado no parece estar relacionada con cambios en la presión de nutrientes, ya que esta zona presenta una mínima influencia antropogénica (el contenido de agua de origen continental supone sólo un 2% y las variables físico-químicas son características de nula o baja presión, como se describe en este mismo informe). Esto demuestra que la RC de $0,8 \mu\text{g l}^{-1}$ y sus correspondientes umbrales no son adecuados para las aguas costeras del Cantábrico oriental.

Usando una RC ligeramente superior ($1,0 \mu\text{g l}^{-1}$) y sus correspondientes umbrales (Muy bueno/Bueno= $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$; Bueno/Aceptable= $3,0 \mu\text{g l}^{-1}$) la estación L-REF10 (D2) se clasificaría sistemáticamente en un estado “Muy bueno” respecto a la clorofila (Figura 77b).

Como puede observarse en la Figura 77, la métrica de la clorofila medida en la estación L-REF10 presenta cierta variabilidad interanual, oscilando entre 0,9 y $1,3 \mu\text{g l}^{-1}$, a lo largo de sucesivos períodos de seis años (contabilizados desde 1993 hasta 2011). Como ya se ha señalado en la primera sección de resultados del presente informe, las variables océano-meteorológicas (temperatura, turbulencia, balance afloramiento/hundimiento, nubosidad, descargas fluviales, etc.) están sujetas a cierta variabilidad climática, lo cual puede afectar también al fitoplancton. Así, en la literatura científica se han documentado cambios abruptos en la biomasa del fitoplancton en relación con cambios en el régimen climático, por ejemplo durante los años 80 (Vantrepotte y Melin, 2010). En cuanto a la estación de L-REF10 (D2), en este informe se describe una ligera disminución de la clorofila-a en las aguas de superficie (0-1 m) durante las dos últimas décadas.

Por lo tanto, a la hora de establecer los límites entre clases de estado para la clasificación de la calidad del agua en la DMA, estos límites tienen que proporcionar suficiente amplitud para recoger la variabilidad a larga escala temporal que manifiestan los indicadores biológicos en respuesta a procesos que no tienen que ver con la presión antrópica en las cuencas (en este caso, procesos climáticos).

Para las otras dos estaciones de referencia sólo se dispone de un periodo completo de 6 años (2006-2011). Durante éste, el percentil 90 es $1,1 \mu\text{g l}^{-1}$ en la estación L-REF20 y $0,7 \mu\text{g l}^{-1}$ en la estación L-REF30.

La métrica promediada para las tres estaciones es $0,88 \mu\text{g l}^{-1}$ y su intervalo de variación (límites mínimo y máximo, 95% confianza) abarca entre $0,32$ y $1,44 \mu\text{g l}^{-1}$. Por lo tanto, tanto la RC propuesta por el JRC ($0,8 \mu\text{g l}^{-1}$), como la recomendada por los expertos de la zona oriental del Cantábrico ($1,0 \mu\text{g l}^{-1}$) es muy similar al valor medio de la métrica en las aguas offshore del País Vasco. Ambas, también, quedan dentro del rango de variación espacial del valor de la métrica en esta zona. Sin embargo, como se observa en la Figura 77, una RC de $1,0 \mu\text{g l}^{-1}$ proporciona una escala de clasificación del estado de calidad que está menos afectada por la variabilidad natural (a larga escala temporal) de la métrica.

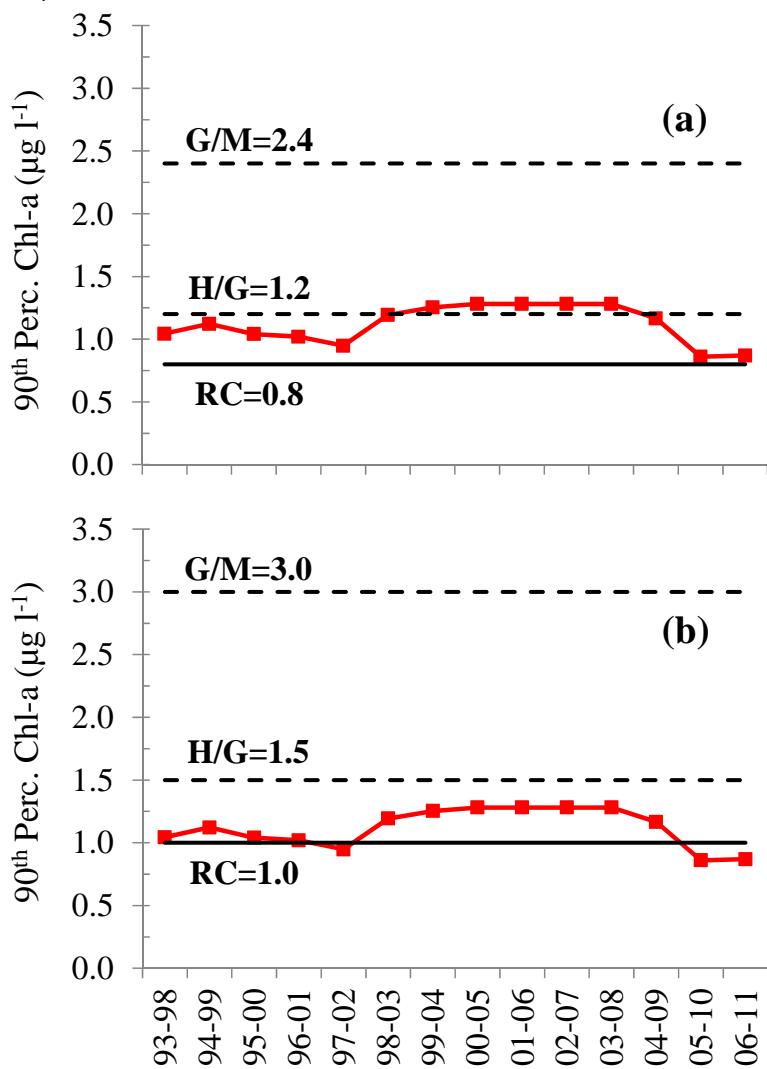


Figura 77. Percentil 90 de la clorofila-a calculado en periodos móviles (6 años) en la estación de referencia L-RF10. Se indica la condición de referencia y los límites entre clases de estado. (a) Valores propuestos por el JRC, (b) Valores propuestos en España. RC (condición de referencia), H/G (High/Good) y G/M (Good/Moderate).

Además, otro problema que podría surgir si se usaran valores muy bajos, tales como los propuestos por el JRC, es que la diferencia entre la RC y el primer límite (Muy bueno/Bueno) es extremadamente pequeña. Por consiguiente, se requeriría una precisión muy alta en cada paso de la evaluación (es decir, tanto en la adquisición de datos, como en la definición de los límites de clase) para evitar resultados erróneos en la clasificación del estado. Hay que reconocer que es difícil lograr una precisión muy alta cuando se miden las variables fitoplanctónicas en redes de monitoreo amplias, así como también a la hora de establecer los límites de clase que están sujetos a cierto error y subjetividad.

En consecuencia, los nuevos valores acordados para la métrica basada en la clorofila (Tabla 10, Oct 2012) se aproximan a los valores recomendados por el JRC con el fin de lograr la comparabilidad con los métodos de otros Estados, pero son algo más altos para evitar una clasificación errónea del estado de calidad biológica, debido a la variabilidad natural del fitoplancton y las limitaciones de los métodos de evaluación. Los valores propuestos por el JRC (Tabla 10, Sep 2012), aunque pueden ser representativos de algunas situaciones específicas, no son adecuados para una amplia zona costera, ni para su aplicación a largo plazo.

Clasificación de las masas de agua costeras del País Vasco basada en la clorofila

Por último, la clasificación de las masas de agua costeras incluidas en la base de datos europea de los ejercicios de intercalibración (2^a fase) se ha revisado con los nuevos valores propuestos para la RC y los límites entre clases de estado.

El conjunto de datos abarca un periodo de 6 años (2003-2008) en las mediciones realizadas en 16 estaciones de muestreo, distribuidas en 4 masas de agua costeras. El EQR (*Ecological Quality Ratio*) y la clasificación del estado de calidad biológica que se obtendría con la RC propuesta para esta región ($1,0 \mu\text{g l}^{-1}$) están indicados en la Tabla 11.

El EQR de las masas de agua presenta valores entre 0,67 y 0,91 para dicho periodo de estudio. El estado resulta “Muy bueno” en 3 de las 4 masas de agua, estando la restante (Getaria-Higer) justo en el límite entre “Muy bueno” y “Bueno” (Tabla 11). Los resultados obtenidos son coherentes con la presión de nutrientes que afecta a la costa vasca (Borja *et al.*, 2006; Revilla *et al.*, 2009).

Tabla 11. Métrica de la clorofila (Percentil 90), EQR y clasificación del estado en las cuatro masas de agua de la costa Cantábrica Oriental incluidas en la intercalibración (2^a fase).

Periodo	Masa de agua	Métrica ($\mu\text{g/l}$)	EQR*	Estado*
2003-2008	Cantabria-Matxitxako	1,2	0,83	Muy bueno
	Matxitxako-Getaria	1,1	0,91	Muy bueno
	Getaria-Higer	1,5	0,67	Muy bueno/Bueno
	Mompás-Pasaia	1,2	0,83	Muy bueno

* Basado únicamente en la clorofila-a

De este análisis también se concluye que los valores propuestos ($\text{RC} = 1,0 \mu\text{g l}^{-1}$; Muy bueno/Bueno = $1,5 \mu\text{g l}^{-1}$; Bueno/Aceptable = $3,0 \mu\text{g l}^{-1}$) son adecuados para la clasificación del estado de calidad biológica del fitoplancton en el Cantábrico oriental en base a la clorofila.

ANEXO D – ACCIONES DE DIFUSIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO

Artículos publicados en revistas científicas

- Novoa, S., G. Chust, J.M. Foridefond, C. Petus, J. Franco, E. Orive, S. Seoane and Á. Borja. 2012. Water quality monitoring in Basque coastal areas using local chlorophyll-a algorithm and MERIS images. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6: 1-27.
- Novoa, S., G. Chust, Y. Sagarminaga, M. Revilla, Á. Borja and J. Franco. 2012. Water quality assessment using satellite-derived chlorophyll-a within the European directives, in the southeastern Bay of Biscay. *Marine Pollution Bulletin*, 64: 739-750.
- Novoa, S., G. Chust, Y. Sagarminaga, M. Revilla, J. Franco, V. Valencia and Á. Borja. 2012. Chlorophyll-a variability within the Basque coastal waters and the Bay of Biscay, between 2005 and 2010, using MODIS imagery. *Revista de Investigación Marina*, 19(5): 92-107.

Tesis doctorales

- Novoa, S. 2012. Water quality assessment and characterization of chlorophyll-a variability related to river discharges, within the southeastern Bay of Biscay: Evaluation and development of chlorophyll-a algorithms for MODIS and MERIS imagery. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco.

Participación en grupos de trabajo internacionales

- Comunicación oral: M. Revilla. Long-term data series of Chl-a and water temperature in the southeastern Bay of Biscay. *ICES Working Group on Phytoplankton and Microbial Ecology (WGPME)*. 21-24 March, 2011, Galway, Ireland.
- Capítulo en informe técnico: Morán, X.A.G, A. Barbosa, M. Revilla, A. Bode, E. Orive, and D. Soudant. 2012. Phytoplankton and microbial plankton of the Bay of Biscay and western Iberian shelf. In: O'Brien, T.D., W.K.W. Li, X.A.G. Moran (Eds). *ICES Phytoplankton and Microbial Plankton Status Report 2009/2010; ICES Cooperative Research Report No. 310*. 196 pp.
- Red internacional de datos y análisis de series temporales de fitoplancton: <http://www.st.nmfs.noaa.gov/nauplius/media/time-series/index-wgpme.html>

Participación en congresos con comunicación oral

- Fontán. Variability in hydroclimatic conditions observed during the period 2000-2009 in relation to the last decades, in the southeastern Bay of Biscay. *ICES/NAFO Symposium on the Variability of the North Atlantic and its Marine Ecosystems during 2000-2009*. 10-12 May 2011, Santander, Spain.
- S. Novoa. Estimation of chlorophyll-a concentration using an empirical bio-optical algorithm and MERIS imagery for monitoring of coastal waters. *5th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone*. 1-3 June 2011, Prague, Czech Republic.
- Y. Sagarminaga. MODIS/AQUA Observations of River Plumes in the Basque Coast during the 2005-2010 Period. Study of their Spatio-Temporal Distribution and Impact into the Shoreline. *50th ECSA Conference: Today's science for tomorrow's Management*. 3-7 June 2012, Venice, Italy.
- M. Revilla. Exploring the response of phytoplankton biomass (chlorophyll-a) to climate forcing in the Basque coast (southeastern Bay of Biscay). *XVII Simposio Ibérico de Estudios en Biología Marina, SIEBM*. 11-14 September 2012, Donostia-San Sebastián, Spain.

Participación en congresos con póster

- Y. Sagarminaga. Variability of coastal turbidity and chlorophyll-a distribution in the Basque coast between 2005-2010 period from MODIS/AQUA observations. *ICES/NAFO Symposium on the Variability of the North Atlantic and its Marine Ecosystems during 2000-2009*. 10-12 May 2011, Santander, Spain.
- M. Revilla. Time-series of sea surface temperature, nutrients and chlorophyll-a in the SE Bay of Biscay. "In situ" measurements along a land-ocean transect. *ICES/NAFO Symposium on the Variability of the North Atlantic and its Marine Ecosystems during 2000-2009*. 10-12 May 2011, Santander, Spain.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, E., E. Nogueira, J.L. Acuna, M. Lopez-Alvarez, and J.A. Sostres. 2009. Short-term dynamics of late-winter phytoplankton blooms in a temperate ecosystem (Central Cantabrian Sea, Southern Bay of Biscay). *Journal of Plankton Research* 31:601-617, doi:10.1093/plankt/fbp012.
- Bald, J. 2005. Propuesta para la evaluación del estado físico-químico de las aguas costeras y de transición del País Vasco. Tesis doctoral, Universidad de Navarra.
- Barnston, A.G., Livezey, R.E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115: 1083-1126.
- Becker, R.A., Chambers, J.M., Walks, A.R. 1988. *The New S Language*, Wadsworth & Brooks/Cole.
- Bode, A., Barquero S., González, N., Álvarez-Ossorio, M.T., Varela, M., 2004. Contribution of heterotrophic plankton to nitrogen regeneration in the upwelling ecosystem of A Coruña (NW Spain). *J. Plankton Res.* 26:11–28.
- Bode, A., R. Anadón, X.A.G. Morán, E. Nogueira, E. Teira, M. Varela, 2011. Decadal variability in chlorophyll and primary production off NW Spain. *Climate Research* 48: 293–305.
- BOE, 2008. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 15340. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica. *Boletín Oficial del Estado* 229, 38472-38582.
- Borja, A., Uriarte, A., Valencia, V., Motos, L., Uriarte, A., 1996. Relationships between anchovy (*Engraulis encrasicholus*) recruitment and the environment in the Bay of Biscay. *Sci. Mar.* 60(Suppl. 2):179–192.
- Borja, A., Uriarte, A., Egaña, J., Motos, L., Valencia, V., 1998. Relationships between anchovy (*Engraulis encrasiculus*) recruitment and environment in the Bay of Biscay (1967–1996). *Fish. Oceanogr.* 7:375–380.
- Borja, A., Franco, J., Valencia, V., Bald, J., Muxika, I., Belzunce, M.J., Solaun, O., 2004. Implementation of the European water framework directive from the Basque Country (northern Spain): a methodological approach. *Mar. Pollut. Bull.* 48: 209–218.
- Borja, A., Fontán, A., Sáenz, J., Valencia, V., 2008. Climate, oceanography, and recruitment: The case of the Bay of Biscay anchovy (*Engraulis encrasiculus*). *Fish. Oceanogr.* 17(6): 477-493.
- Borja, Á., Bald, J., Franco, J., Larreta, J., Muxika, I., Revilla, M., Rodríguez, J.G., Solaun, O., Uriarte, A., Valencia, V., 2009. Using multiple ecosystem components, in assessing ecological status in Spanish (Basque Country) Atlantic marine waters. *Mar. Pollut. Bull.* 59: 54–64.
- Borja, A., J. Bald, M.J. Belzunce, J. Franco, J.M. Garmendia, J. Larreta, I. Muxika, M. Revilla, J.G. Rodríguez, O. Solaun, A. Uriarte, V. Valencia, I. Zorita, I. Adarraga, F. Aguirrezabalaga, I. Cruz, A. Laza, M.A. Marquiegui, J. Martínez, E. Orive, J.Mª Ruiz, S. Seoane, J.C. Sola, A. Manzanos, 2010. Red de seguimiento del estado ecológico de las aguas de transición y costeras de la Comunidad Autónoma del País Vasco. Informe de AZTI-Tecnalia para la Agencia Vasca del Agua. 21 Tomos, 707 pp.
- Borja, Á., Galparsoro I., Irigoien, X., Iriondo, A., Menchaca, I., Muxika, I., Pascual, M., Quincoces, I., Revilla, M., Rodríguez, J.G., Santurtún, M., Solaun, O., Uriarte, A., Valencia, V., Zorita, I., 2011. Implementation of the European Marine Strategy Framework Directive:

A methodological approach for the assessment of environmental status, from the Basque Country (Bay of Biscay). *Mar. Pollut. Bull.* 62: 889–904.

- Bowers, D.G., D. Evans, D.N. Thomas, K. Ellis, and P.J.L.B.Williams. 2009. Interpreting the colour of an estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 59:13-20.
- Cabanas, J.M., Lavín, A., García, M.J., González-Pola, C., Tel, E., 2003. Oceanographic variability in the northern shelf of the Iberian Peninsula, 1990-1999. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 71-79.
- Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.A., Lee, A.J., 1988. The “great salinity anomaly” in the northern North Atlantic 1968–1982. *Progress in Oceanography*, 20: 103-151.
- Domingues RB, Barbosa A, Galvão H., 2008. Constraints on the use of phytoplankton as a biological quality element within the Water Framework Directive in Portuguese waters. *Mar. Pollut. Bull.* 56:1389–1395.
- Druon J.N, S. Loyer, F. Gohin (2005). Scaling of coastal phytoplankton features by optical remote sensors: comparison with a regional ecosystem model. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20): 4421-4444
- European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.
- Fontán, A., Valencia, V., Borja, Á., Goikoetxea, N. 2008. Oceano-meteorological conditions and coupling in the southeastern Bay of Biscay, for the period 2001-2005: A comparison with the past two decades. *Journal of Marine Systems* 72: 167-177.
- García-Barcina, J.M., J.A. González-Oreja, and A. De la Sota. 2006. Assessing the improvement of the Bilbao estuary water quality in response to pollution abatement measures. *Water Research* 40:951-960.
- García-Soto, C., I. de Madariaga, F. Villate, and E. Orive. 1990. Day-to-day variability in the plankton community of a coastal shallow embayment in response to changes in river runoff and water turbulence. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 31: 217-229.
- Gobierno Vasco, 2011. Cambio climático: impacto y adaptación en la Comunidad Autónoma del País Vasco. 112 pp.
- Gohin, F., Druon, J.N., Lampert, L. 2002. A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing* 23: 1639–1661.
- Gohin, F., B. Saulquin, H. Oger-Jeanneret, L. Lozac'h, L. Lampert, A. Lefebvre, P. Riou, F. Bruchon, 2008. Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations. *Remote Sensing of Environment* 112: 3329-3340.
- Goikoetxea, N., Borja, Á., Fontán, A., González, M. and Valencia, V., 2009. Trends and anomalies of sea surface temperature during the last 60 years, within the southeastern Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 29: 1060-1069.
- González, M., Fontán, A., Borja, Á., del Campo, A., Esnaola, G., Ferrer, L., Goikoetxea, N., Mader, J., Uriarte, Ad., and Valencia, V., 2010. Trend analysis of multidecadal datasets of air and sea surface temperatures within the southeastern Bay of Biscay. *Thalassas*, 26(2): 23-31.
- González, M., Fontán, A., Esnaola, G. y Valencia, V., 2011a. Variaciones multidecadales notables en la temperatura atmosférica, temperatura superficial y nivel del mar en el sudeste del golfo de Vizcaya, detectadas mediante filtros “Kolmogorov-Zurbenko”. *RIM* 17(8): 1-15.

- González, M., Fontán, A., Esnaola, G. and Collins, M., 2011b. Abrupt changes, multidecadal variability and long-term trends in sea surface temperature and sea level datasets within the southeastern Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*, doi:10.1016/j.jmarsys.2011.11.014.
- Hyndman, R. J., Fan, Y. 1996. Sample quantiles in statistical packages, *American Statistician*, 50: 361-365.
- Lahet, F., S. Ouillon, and P. Forget. 2001. Colour classification of coastal waters of the Ebro river plume from spectral reflectances. *International Journal of Remote Sensing* 22: 1639-1664.
- Madariaga, I. 1987. Variabilidad a pequeña escala temporal de la biomasa y de la producción primaria en el estuario de Gernika en julio de 1987. Tesis de Licenciatura, Universidad del País Vasco, Bilbao. 157 pp.
- Madariaga, I. 1989. Uhertasun-alakuntzak Gernikako estuarioan. *Elhuyar* 15: 8-12.
- Morán, X.A.G, A. Barbosa, M. Revilla, A. Bode, E. Orive, and D. Soudant. 2012. Phytoplankton and microbial plankton of the Bay of Biscay and western Iberian shelf. In: O'Brien, T.D., W.K.W. Li, X.A.G. Moran (Eds). *ICES Phytoplankton and Microbial Plankton Status Report 2009/2010; ICES Cooperative Research Report No. 310*. 196 pp.
- Mudelsee, M. 2000. Ramp function regression: A tool for quantifying climate transitions. *Computers and Geosciences* 26:293–307.
- Mudelsee, M. 2010. *Climate Time Series Analysis: Classical Statistical and Bootstrap Methods*. Springer, Dordrecht Heidelberg London New York, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Vol. 42, 474 pp.
- Novoa, S., G. Chust, V. Valencia, J.-M. Froidefond, D. Morichon, 2011. Estimation of chlorophyll-a concentration in waters over the continental shelf of the Bay of Biscay: a comparison of remote sensing algorithms. *International Journal of Remote Sensing*. doi: 10.1080/01431161.2010.540588.
- Novoa, S., G. Chust, Y. Sagarminaga, M. Revilla, J. Franco, V. Valencia, A. Borja, 2012. Chlorophyll-a variability within the Basque coastal waters and the Bay of Biscay, between 2005 and 2010, using MODIS imagery. *Revista de Investigación Marina* 19(5): 92-107.
- O'Reilly, J. ,S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. Siegel, K. L. Carder, S. Garver, M. Kahru, and C. McClain, 1998. "Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS," *J. Geophys. Res.* 103: 24937–24953.
- Pérez, F.F., Pollard, R.T., Read, J.F., Valencia, V., Cabanas, M., Ríos, A.F., 2000. Climatological coupling of the thermohaline decadal changes Eastern North Atlantic Central Water. *Scientia Marina*, 64(3): 347-353.
- Petus, C., G. Chust, F. Gohin, D. Doxaran, J.M. Froidefond, Y. Sagarminaga, 2010. "Estimating turbidity indicators and total suspended matter in the Bay of Biscay using MODIS 250-m imagery," *Continental Shelf Research*, 30: 379-392.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teulosky, S.A. and Vetterling, W.T., 1989. *Numerical Recipes*. Cambridge University Press, 702 pp.
- Press, W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, 1992. *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 936 pp.
- Pugh, D.T., 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level: A Handbook for Engineers and Scientists*. Wiley, Chichester, 472 pp.
- Pugh, D.T., 2004. *Changing Sea Levels*. Cambridge University Press, 256 pp.
- Revilla, M., Borja A., Bald, J., Franco, J., Valencia V. 2008. A method based on chlorophyll-a concentration for the assessment of phytoplankton status in coastal and transitional

waters. XI International Symposium on Oceanography of the Bay of Biscay. Revista de Investigación Marina 3, 219–220; <http://www.azti.es>.

- Revilla, M., J. Franco, J. Bald, A. Borja, A. Laza, S. Seoane, V. Valencia, 2009. The assessment of the phytoplankton ecological status in the Basque coast (northern Spain) according to the European Water Framework Directive. *Journal of Sea Research* 61:60–67.
- Revilla, M., Borja, Á., Fontán, A., Franco, J., González, M., Valencia, V. 2010. A two-decade record of surface chlorophyll "a" and temperature in offshore waters of the Basque country (southeastern Bay of Biscay). *Revista de Investigación Marina* 17(2): 13–20. <http://www.azti.es/rim>.
- Revilla, M., A. Borja, J. Franco, I. Menchaca, V. Valencia, I. Zorita. 2011. Estudio de la sensibilidad a la eutrofización de los estuarios del País Vasco en 2010. Informe de la Fundación AZTI-Tecnalia para la Agencia Vasca del Agua- Uraren Euskal Agentzia. 63 pp + Anexo.
- Smith, T.M. and R.W. Reynolds, 2004. Improved Extended Reconstruction of SST (1854–1997). *Journal of Climate*, 17: 2466-2477.
- Tudesque, L., M. Gevrey, G. Grenouillet, and S. Lek, 2008. Long-term changes in water physicochemistry in the Adour-Garonne hydrographic network during the last three decades. *Water research* 42:732-42.
- Valencia, V., Franco, J., 2004. Main characteristics of the water masses. In: Borja, A., Collins, M. (eds.), *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*. Elsevier Oceanography Series, vol. 70. Elsevier, Amsterdam, pp. 197–232.
- Valencia, V., Motos, L., Urrutia, J. 1989. Estudio de la variación temporal de la hidrografía y el plancton en la zona nerítica frente a San Sebastián. *Informes Técnicos (Departamento de Agricultura y Pesca, Gobierno Vasco)* 20: 1-81.
- Valencia, V., Borja, Á. Fontán, A., Pérez, F.F., Ríos, A.F., 2003. Temperature and salinity fluctuations in the Basque Coast (Southeastern Bay of Biscay), from 1986 to 2000, related to the climatic factors. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 340-342.
- Valencia, V., Franco, J., Borja, Á. and Fontán, A., 2004. Hydrography of the southeastern Bay of Biscay. In: Borja, A., Collins, M. (eds.), *Oceanography and Marine Environment of the Basque Country*. Elsevier Oceanography Series, vol. 70. Elsevier, Amsterdam, pp. 159–194.
- Valencia, V., Fontán, A., Borja, Á., Goikoetxea, N., Sáenz, J., 2009. Recent climatic changes in the SE Bay of Biscay affecting pelagic and coastal ecosystems. *ICES CM 2009/G:11*, 13 pp.
- Vantrepotte, V., Mélin, F. 2010. Temporal variability in SeaWiFS derived apparent optical properties in European seas. *Continental Shelf Research*, 30: 319-334.
- Yang, W. and Zurbenko, I., 2010. Nonstationarity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*: 107-115.
- Zurbenko, I.G., Porter, P.S., Rao, S.T., Ku, J.Y., Gui, R. and Eskridge, R.E., 1996. Detecting discontinuities in time series of upper air data: development and demonstration of an adaptive filter technique. *Journal of Climate*, 9: 3548–3560.