

EVIDENCIAS BIOXEOQUÍMICAS DO CAMBIO CLIMÁTICO

C. G. Castro¹, X. A. Álvarez-Salgado¹, E. Nogueira², J. Gago³, F. F. Pérez¹, A. Bode³,
A. F. Ríos¹, G. Rosón⁴ e M. Varela³

¹ Instituto de Investigacións Mariñas, CSIC

Eduardo Cabello, 6, 36208 Vigo.

Correo_e: cgcastro@iim.csic.es

² Instituto Español de Oceanografía

Centro Oceanográfico de Xixón

Avenida Príncipe de Asturias, 70 bis, 33212 Xixón (Asturias)

³ Instituto Español de Oceanografía

Centro Oceanográfico da Coruña. Apdo. 130. 15080 A Coruña.

⁴ Facultade de Ciencias do Mar. Universidade de Vigo

Campus Lagoas Marcosende s/n. 36310 Vigo.

RESUMO

Neste capítulo avaliamos as evidencias bioxeoquímicas do cambio climático de acordo coa compilación das distintas observacións oceanográficas levadas a cabo fronte ás costas galegas. O estudo das series temporais das estacións oceanográficas situadas fronte á Coruña, no interior da ría de Vigo e na plataforma adxacente fronte a ría de Vigo mostra que só a concentración de silicato, tanto en superficie como en fondo fronte A Coruña, e a concentración de nitrato en fondo na plataforma adxacente fronte a ría de Vigo, mostran unha tendencia lineal de longo termo. No océano adxacente, a análise conxunta dos datos recompilados nas distintas campañas oceanográficas realizadas na zona tampouco mostra unha tendencia de longo termo na concentración de nutrientes da auga central do Atlántico nordeste (ACNAE), malia que se observa un descenso de pH de 0.052 por década. Así mesmo, de acordo coa relación entre temperatura e concentración de nitrato da ACNAE na capa de mestura invernal, parece existir unha diminución dos niveis de nitrato no momento de formación da masa de auga, tendo en conta os mínimos de temperatura invernal fornecido polo programa International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS). Por outro lado, o descenso dos ventos de compoñente norte, aínda que provocan un descenso do nutriente que aflora na plataforma, tamén incrementan o tempo de residencia da auga aflorada no interior das rías, de tal xeito que a produción neta destas non diminúe tanto como cabería esperar só por concentración de nutriente aflorado.

SUMMARY

In this chapter, we asses the biogeochemical evidences of climate change based on the compilation of different oceanographic data sets sampled off the Galician coast. The time series of the stations off A Coruña, the central zone and the adjacent continental shelf of the Ría de Vigo only reveal a long term trend for silicate concentrations - surface and bottom- at the station off A Coruña and for the bottom nitrate for the station off the Ría de Vigo. The joint analysis of the data collected from different campaigns in Galicia's adjacent ocean did not show any long term trend on ENACW nutrient levels either. We only observed a clear decrease in pH levels of 0.052 per decade. Based on the relationship between nitrate and temperature for the winter mixed layers and vernal minimum temperatures from the International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (ICOADS), it seems to be a diminishing on nutrient concentration at the water mass formation time. On the other hand, the diminishing of northerly winds, although they caused a decrease in upwelled nutrient over the shelf, also increases the upwelled water residence time in such a way that the total effect on the net ecosystem production is not as strong as expected only for upwelled nutrient.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que as marxes costeiras ocupan $< 10\%$ da superficie oceánica global e $< 0.5\%$ do seu volume total, dominan en canto a interese socioeconómico. Dada a súa grande importancia a escala global, as marxes costeiras son zonas especialmente susceptibles ao cambio climático. Gran parte da investigación sobre o cambio climático centrouse no impacto directo da temperatura á hora de explicar as variacións dos ecosistemas. Non obstante, estudos recentes mostran que a relación entre os cambios abióticos e as respostas dos ecosistemas é substancialmente máis complexa. Por exemplo, cambios de natureza química poden repercutir en maior medida que a temperatura á resposta dun determinado ecosistema ao cambio climático. Neste contexto, o que se pretende neste capítulo é realizar unha revisión do coñecemento existente sobre a resposta bioxeoquímica ao cambio climático nas augas das rías e océano adxacente.

Co fin de abordar este obxectivo, o ideal sería dispoñer dunha serie temporal de observacións oceanográficas de longo termo en lugares estratéxicos. De feito, os estudos bioxeoquímicos de longo termo en oceanografía baséanse na simple idea de que certos procesos, tales como cambios na estrutura da comunidade e na produtividade derivados por cambios climáticos, e cambios naturais e/ou antrópicos nas achegas de nutrientes, son procesos de longo termo e como tales deben ser estudados (Strayer e outros, 1986). De aí que proxectos internacionais como o Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS), cuxos obxectivos son determinar e entender a escala global os procesos que regulan os fluxos de carbono e elementos bioxénicos asociados nos océanos, e avaliar os intercambios destes elementos coa atmosfera, o fondo mariño e os límites continentais (SCOR, 1990), defina como unha das súas actuacións prioritarias o establecemento de estacións oceanográficas para o seguimento de series temporais de longo termo.

No caso das costas galegas, existe desde finais da década de 1980 unha serie temporal na plataforma costeira, fronte á Coruña e outras na parte central da ría de Vigo e plataforma adxacente (figura 1). O obxecto das devanditas estacións observacionais é axudar a comprender a resposta do ecosistema peláxico diante das diversas fontes de variabilidade temporal, tanto nas súas características oceanográficas como no que a poboacións planctónicas se refire (Valdés e cols., 1991; Casas e cols., 1997; Nogueira e Figueiras, 2005). Non obstante, no caso do océano adxacente ás costas galegas non existe ningún estudo bioxeoquímico de longo termo, e as observacións oceanográficas limítanse a unha serie de campañas puntuais realizadas en distintos períodos e que abarcan diferentes zonas fronte ás costas galegas. Por isto, e como se indicou no capítulo 14, co fin de ter unha idea da variabilidade bioxeoquímica temporal no océano adxacente, tivemos que recorrer á construción dunha serie temporal “artificial”, agrupando datos obtidos en distintas campañas oceanográficas puntuais realizadas na mesma rexión. Así pois, este capítulo ten que ser entendido como un resumo das posibles tendencias ou respostas bioxeoquímicas (ecolóxicas) ao cambio climático que se poden extraer baseándose no conxunto de observacións oceanográficas realizadas ata o momento nas costas galegas.

Comezaremos describindo as series de datos oceanográficos de rexistro temporal máis longo localizadas fronte á Coruña e na ría de Vigo. Despois centrarémonos no estudo da variabilidade temporal do contido en sales nutrientes da auga subsuperficial aflorada: auga central do Atlántico nordeste (ACNAE). Para iso, estudaremos as posibles variacións que, en función das condicións invernais, poden sufrir as propiedades químicas da ACNAE no momento de formación. Así mesmo, analizaremos a variación temporal das variables bioxeoquímicas da ACNAE no océano adxacente, de acordo cos datos das campañas oceanográficas realizadas na zona de estudo. Tendo en conta que a produtividade das rías depende da cantidade de sales nutrientes que entran nelas durante os



eventos de afloramento, avaliaremos como a variabilidade do réxime de afloramento inflúe sobre a fertilización das rías e, polo tanto, na súa produción primaria. Finalmente, describiremos a variación do grao de acidificación das augas no océano adxacente á plataforma galega no contexto dun incremento de acidificación a escala global (Caldeira e Wickett, 2003).

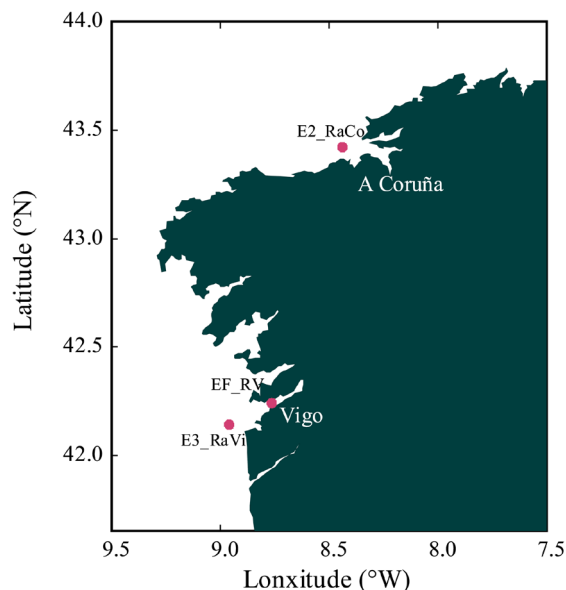


Figura 1. Posición das estacións estudadas na costa galega: estación fixa na ría de Vigo (EF_RV), estación 3 da radial de Vigo (E3_RaVi) e estación 2 da radial da Coruña (E2_RaCo).

MÉTODOS

Series temporais de longo termo

As series temporais situadas na plataforma continental fronte á Coruña (estación E2, 43°25.3' N e 8°26.3' O; E2_RaCo) e Vigo (estación E3, 42° 8.5' N e 9° 7.5' O; E3_RaVi; figura 1) comenaron a súa andaina a principios de 1989 e 1994 respectivamente, cunha frecuencia de mostraxe mensual. O mantemento das devanditas series enmárcase no programa de series temporais a longo termo RADIALES, levado a cabo polo Instituto Español de Oceanografía (IEO) [<http://www.series-temporales-ieo.net/>]. En cada visita ás estacións realízase a toma de mostras a sete profundidades distintas desde superficie ata 70 m por medio de botellas Niskin. Os nutrientes inorgánicos determináanse seguindo técnicas estándar por medio de análise de fluxo segmentado cun autoanализador Technicon (Strickland e Parsons, 1972). Neste traballo as devanditas series analizaronse ata decembro de 2006.

A estación de longo termo mostrexada na canle central de ría de Vigo (EF_RVi) está localizada na posición 42°14.5'N 8°45.8'W (figura 1). No período comprendido entre 1987 e 1993 mostrexouse cunha frecuencia de dúas veces por semana polo Grupo de Oceanoloxía do Instituto de Investigacións Mariñas (IIM, CSIC). A partir de 1994 e ata a actualidade, o IEO mantén esta estación cunha frecuencia de mostraxe mensual no marco do programa RADIALES. Unha descrición detallada

dos métodos de mostraxe e análise, similares para todas as devanditas series, pode atoparse en Nogueira e cols. (1997).

As series temporais sometéronse ao método de análise harmónica coa finalidade de identificar os principais modos de variación. Posteriormente, as series foron modeladas mediante a aproximación Box-Jenkins (Box e Jenkins 1976). Esta aproximación xa foi aplicada con anterioridade á serie temporal EF_RVi (Nogueira, 1998 e Nogueira e cols., 1998). A compoñente estacional (CE) definiuse como combinación do primeiro e segundo harmónicos do período anual:

$$CE[x_t] = A_{12} \cos\left(\frac{2\pi}{12}t + F_{12}\right) + A_6 \cos\left(\frac{2\pi}{6}t + F_6\right) \quad (1)$$

Onde, A_{12} e A_6 son as amplitudes do primeiro (período, $T = 12$ meses) e segundo ($T = 6$ meses) harmónicos do período anual respectivamente, e F_{12} e F_6 , as respectivas fases en radiáns. Estes parámetros foron extraídos mediante análise de Fourier (Poularikas e Seely 1991). A variabilidade a longo termo foi parametrizada como a pendente da tendencia lineal. Consideráronse tamén as compoñentes cíclicas a longo termo que contabilizasen máis do 2.5% da variabilidade das series. A compoñente estocástica das series, é dicir, os residuos unha vez filtradas as compoñentes estacionais e de variabilidade a longo termo, parametrizáronse mediante un modelo autorregresivo, o que implica a descrición dos residuos en termos dunha suma ponderada dos valores pasados da propia serie:

$$R[x_t] = \phi_i(R[x_{t-i}]) + a_t \quad (2)$$

Onde, ϕ_i son as compoñentes autorregresivas e a_t representan os residuos prebranqueados, é dicir, unha serie temporal de flutuacións aleatorias independentes e cunha distribución normal de media cero e varianza constante. A orde do proceso autorregresivo definiuse mediante as funcións de autocorrelación e autocorrelación parcial (acf e pacf, respectivamente) e os parámetros autorregresivos estimáronse mediante as ecuacións Yule-Walker (Wei, 1989).

Establecemento da capa de mestura invernal

Para o establecemento da profundidade da capa de mestura invernal no océano adxacente ás costas galegas, empregouse como criterio un cambio na anomalía de densidade de 0.05 kg m^{-3} nun intervalo de 5 metros (Mitchell e Holm-Hansen, 1991).

As series temporais de longo termo para a temperatura superficial oceánica do mes de marzo en dúas cuadrículas de $(1^\circ \times 1^\circ)$ centradas en 42° N 45° N ao longo de 10° W obtivéronse da base de datos do proxecto ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere DataSet, <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/coads>). No marco deste proxecto internacional recompiláronse datos de barcos de oportunidade na superficie do mar en cadrados de $(1^\circ \times 1^\circ)$ para o período entre 1960 a 2005.



Análise da variabilidade temporal da concentración de nutrientes na ACNAE

Para a análise da variabilidade temporal de concentración de nutrientes na ACNAE, recompiláronse os datos de todas as campañas oceanográficas realizadas na área entre 42° e 43° N e entre 11° W e a lonxitude da isóbata de 1000 m, e nas que ademais das variables termohalinas se obtiveron datos de variables químicas (sales nutrientes, oxíxeno, pH, alcalinidade...). Na táboa 1 especifícanse, ademais das campañas, as referencias onde se pode atopar unha descrición da metodoloxía empregada en cada caso.

Táboa 1. Nome, datas e variables analizadas nas campañas empregadas para a construción da serie temporal da ACNAE ao nivel isopícnico de 27.1

Campaña	Referencia	Período	Variables					
			Temp	Sal	NO3	SiO4	PO4	O2
Galicia IV	Manríquez e cols. (1978)	7-28 outubro 1977	x	x	x	x	x	x
Galicia V	Teira e cols. (en prensa)	10-19 novembro 1982	x	x	x	-	x	x
Galicia VI	Pérez e cols. (1985)	1-12 decembro 1983	x	x	x	x	x	x
Galicia VII	Fraga e cols. (1985)	18 febreiro - 7 marzo 1984	x	x	x	x	x	x
Galicia VIII	Mouriño e cols. (1985)	13-24 xullo 1984	x	x	x	x	x	x
Galicia IX	Fraga e cols. (1987)	4-27 setembro 1986	x	x	x	x	x	x
ANA	Ríos e cols. (1992)	17-26 novembro 1988	x	x	x	x	-	x
Galicia XI	Castro e cols. (1994)	10-14 maio 1991	x	x	x	x	x	x
Galicia XII	Castro (1997)	10-18 setembro 1991	x	x	x	x	x	x
Morena I	Pérez e cols. (1995)	10-26 maio 1993	x	x	x	x	x	x
CD105B	Álvarez-Salgado e cols. (2002)	12 - 20 xuño 1997	x	x	x	x	x	-
BE9714	Álvarez-Salgado e cols. (2002)	19 - 29 xuño 1997	x	x	x	x	x	x
CD110pol	Álvarez-Salgado e cols. (2002)	6 - 16 xaneiro 1998	x	x	x	x	x	x
BE9815	Álvarez-Salgado e cols. (2002)	26 xuño - 7 xullo 1998	x	x	x	x	x	x
ST0898	OMEX Project	3-10 agosto 1998	x	x	x	x	x	x
M43_2	OMEX Project	28 decembro - 14 xaneiro 1998	x	x	x	-	x	x
BG9919B	OMEX Project	4-11 setembro 1999	x	x	x	x	x	x
Dybagá	Castro e cols. (2006)	15 maio 2001- 24 abril 2002	x	x	x	x	x	x
Zotracos	Teira e cols. (en prensa)	9-14 febreiro 2005	x	x	x	x	x	x

Reconstrución da utilización neta de sales nutrientes no sistema rías-plataforma nos últimos 40 anos.

Aínda que non dispoñemos de series históricas de datos de utilización neta de sales nutrientes, ou produción neta de materia orgánica (PN), no sistema rías-plataforma é posible facer unha reconstrución desta baseándose nas relacións paramétricas que Pérez e cols. (2000) e Álvarez-Salgado e cols. (2002) obtiveron entre os pulsos de tensión e relaxación dos ventos do nordeste e a PN das Rías Baixas e da plataforma continental adxacente, respectivamente.

Pérez e cols. (2000) atoparon que o 70% da variabilidade da PN da ría de Arousa a escala semanal durante o período favorable ao afloramento do ano 1989 (en $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) se pode explicar usando a seguinte ecuación empírica:

$$\text{PN} = 574(\pm 144) \times (-Q_{x_{-1}}) - 287(\pm 115) \times (-Q_{x_0}) + 3(\pm 1) \times (H_0 + H_{-1}) - 1637(\pm 287) \times BV_0$$

$$R^2 = 0.70, n = 46, P < 0.001$$

Onde $-Q_{x_0}$ e $-Q_{x_{-1}}$ son os transportes de Ekman medios na semana en que se calcula a PN e na semana anterior, respectivamente. O transporte de Ekman é unha estimación do volume de auga que aflora sobre a plataforma (en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ de costa) directamente proporcional ao cadrado da intensidade dos ventos do nordeste (véxase o capítulo 13); H_0 e H_{-1} son o intercambio de calor coa atmosfera na semana que se calcula a PN e na semana anterior, respectivamente (en $\text{cal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); e BV_0 é a estabilidade da columna de auga na semana en que se calcula a PN (en min^{-1}). Polo tanto, o 70% da variabilidade da PN a escala semanal pódese explicar por medio dunha simple combinación lineal de tres variables físicas. A ecuación indícanos que a intensidade do afloramento na semana anterior é a variable que máis fai incrementar a PN. Pola contra, o afloramento durante a propia semana reduce a PN porque activa a circulación da ría, diminuíndo o tempo de residencia do fitoplancto que crece na capa superficial da ría a expensas dos sales nutrientes que a fertilizaron na semana anterior. A combinación lineal de $-Q_{x_0}$ e $-Q_{x_{-1}}$ é responsable do 43% da variabilidade explicada pola ecuación. O intercambio de calor coa atmosfera contribúe positivamente ao incremento da PN de dúas maneiras. H_{-1} incrementa a estabilidade térmica da columna durante a semana previa, paliando parcialmente a negativa influencia de $-Q_{x_0}$. Por outra banda, H_0 afecta positivamente á PN porque é proporcional á intensidade de luz dispoñible para a fotosíntese. A inclusión do termo $H_0 + H_{-1}$ na ecuación incrementa a porcentaxe de varianza explicada ata un 80%. Finalmente, o restante 20% explícase ao considerar a estabilidade media da columna de auga durante o período estudado, que reduce a PN ao desfavorecer o transporte vertical de nutrientes, tanto por convección como por difusión turbulenta. Malia que se introduciron as achegas continentais como posible variable explicativa dos cambios de PN, a súa influencia non resultou ser estatisticamente significativa. Alimentado a ecuación de Pérez e cols. (2000) co transporte de Ekman calculado diariamente en 43°N 11°W a partir dos mapas sinópticos de presión atmosférica ao nivel do mar producidos pola Axencia Estatal de Meteoroloxía (véxase o capítulo 13) e asumindo que non houbo cambios significativos en H e BV , podemos reconstruír a PN media da ría de Arousa no período de afloramento de 1966 a 2006.

Por outra banda, Álvarez-Salgado e cols. (2002) atoparon que o 83% da variabilidade da PN do sistema rías-plataforma a escala quincenal durante o período favorable ao afloramento entre os anos 1987 e 1999 (en $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) se pode explicar usando a seguinte ecuación empírica:

$$\text{PN} (\pm 197) = [1.1(\pm 0.1) + 5(\pm 1) \cdot 10^{-4} \times (-Q_{x_0})] \times (-Q_{x_0}) + 0.15(\pm 0.04) \times (-Q_{x_{-1}})$$

$$R^2 = 0.83, n = 144, P < 0.001$$

Onde $-Q_{x_0}$ e $-Q_{x_{-1}}$ (en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ de costa) son o transporte de Ekman medio na quincena en que se calcula a PN e na quincena anterior, respectivamente. Polo tanto, segundo esta ecuación, a PN é unha función cuadrática $-Q_{x_0}$, porque o transporte de Ekman inflúe tanto no volume de auga aflorada como na súa calidade: canto maior é $-Q_{x_0}$, maior é a profundidade desde a que aflora a auga,



menor a súa temperatura e, consecuentemente, maior o seu contido en sales nutrientes. Nótese que PN tamén depende positivamente do transporte de Ekman medio da quincena anterior, porque $-Qx_1$ tamén afecta á temperatura da auga de fondo da plataforma e, polo tanto, indirectamente á concentración de sales nutrientes da auga aflorada. Novamente, alimentado a ecuación de Álvarez-Salgado e cols. (2002) co transporte de Ekman calculado en $43^\circ \text{ N } 11^\circ \text{ W}$, podemos reconstruír a PN media do sistema rías-plataforma no período de afloramento de 1966 a 2006.

Avaliación da acidificación no océano adxacente ás costas galegas

Para a avaliación do grao de acidificación no océano adxacente ás costas galegas, empregaremos unha serie de campañas en que se levaron a cabo análises das variables do carbónico; pH, alcalinidade total e/ou carbónico inorgánico total disolto. Na táboa 2 móstranse as campañas xunto coas referencias correspondentes, onde se describen con detalle as analíticas utilizadas.

A determinación do CO_2 antrópico (CANT) que contén unha mostra de auga determínase descontándolles aos valores medidos do contido total CO_2 aqueles debidos á disolución de CaCO_3 , á descomposición da materia orgánica na columna de auga e ao contido total CO_2 cando se formaron as masas de auga na época preindustrial (Vázquez-Rodríguez e cols., 2008, enviado). Unha vez coñecidos os valores de CANT para cada capa de auga nas distintas campañas (táboa 2), determínase a contribución en pH debido ao incremento de CANT como valores medios da variación do pH desde a era preindustrial (ΔpH) en distintas capas oceánicas para a área xeográfica que abarca desde a península Ibérica ao meridiano 20° W , e desde 36° N a 43° N (Ríos e cols., 2001) normalizados a unha posición media ($42^\circ \text{ N}, 15^\circ \text{ W}$).

Táboa 2. Táboa coas campañas empregadas para establecer a evolución temporal da variación do pH desde a era preindustrial (ΔpH) debido á captura de CANT.

Ano	Mes	Campaña	Referencia
1977	Outubro	Galicia IV	Manríquez e cols. (1978)
1981	Novembro	TTO	TTO NAS (1981)
1982	Novembro	Galicia V	Mouriño e cols. (1984)
1983	Decembro	Galicia VI	Pérez e cols. (1985)
1984	Febreiro	Galicia VII	Fraga e cols. (1985)
1984	Xullo	Galicia VIII	Mouriño e cols. (1985)
1986	Setembro	Galicia IX	Fraga e cols. (1987)
1989	Maio	Bordest 3	Arhan e cols. (1991)
1991	Abril-maio	Vivaldi	Pollard e cols. (1991)
1993	Maio	Morena I	Pérez e cols. (1995)
1993	Xullo	OACES	Castle e cols. (1998)
1997	Agosto	Fourex	Álvarez e cols. (2003)
2002	Xuño	OVIDE02	Lherminier e cols. (2007)
2004	Xuño	OVIDE04	Lherminier e cols. (2007)
2006	Xuño	OVIDE06	Lherminier e cols. (2007)

RESULTADOS E DISCUSIÓN

Series temporais na costa galega

Desde un punto de vista oceanográfico, a costa NO da península Ibérica constitúe a rexión de afloramento máis importante de Europa. As rexións de afloramento localizadas nos bordos occidentais dos continentes (Perú, California, Chile, Sudáfrica e noroeste de África como rexións máis importantes) son zonas de máxima riqueza mariña, comparables pola súa produtividade cos prados fertilizados en sistemas terrestres. Así, a pesar de ocuparen só o 0.1% da superficie do océano, sosteñen o 50% da produción pesqueira a escala global (FAO Fisheries, 1997). Consecuencia directa deste afloramento costeiro é o feito de que as Rías Baixas sexa a rexión europea coa maior produción de mexillón ($\sim 250 \times 10^6$ kg ano⁻¹; Labarta, 2000) e unha das máis importantes do mundo.

Agora ben, na rexión de afloramento das costas galegas distínguense dous subréximes de afloramento, localizados ao norte e sur do cabo Fisterra. Estas dúas subrexións non só se diferencian polo réxime de ventos favorables ao afloramento, senón tamén pola natureza da auga aflorada (Castro e cols., 2000) e os patróns de remineralización da materia orgánica sobre a plataforma (Álvarez-Salgado e cols., 1997). As estacións oceanográficas de series temporais de longo termo consideradas neste traballo están estratexicamente situadas nos dous subréximes descritos: unha na plataforma continental da Coruña (E2_RaCo) e as outras dúas no segmento medio da ría de Vigo (EF_RVi) e na plataforma adxacente (E3_RaVi) (figura 1). Para ilustrar a evolución dos nutrientes no ecosistema, considérase aquí a evolución temporal do nitrato, como nutriente que limita a produción do fitoplancto e responsable da produción nova, e do silicato, pola súa importancia no metabolismo das diatomeas, grupo de fitoplancto dominante nos sistemas de afloramento (figuras 2-4).

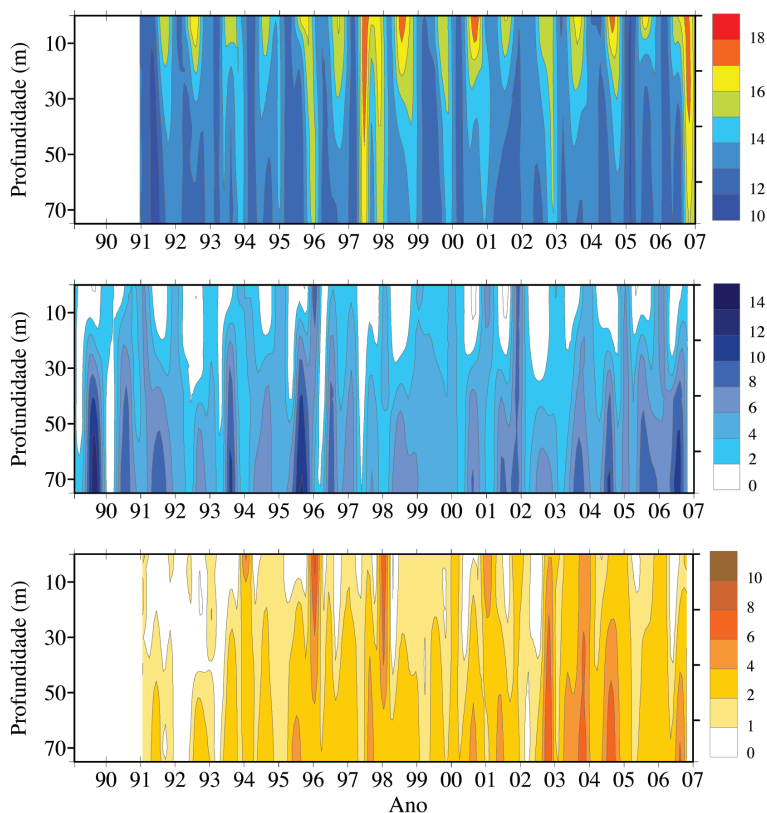


Figura 2. Evolución temporal de temperatura (a), nitrato (b), e silicato (c) para a estación E2 fronte á Coruña do ano 1990 ata 2007. Temperatura en °C e nutrientes en $\mu\text{mol kg}^{-1}$.

Serie temporal na plataforma fronte á Coruña

A serie temporal na plataforma continental da Coruña é a máis antiga do sistema de afloramento do noroeste de África; o ano que vén cumpriranse 20 anos do inicio do programa. Os datos recollidos mensualmente entre maio de 1989 e decembro de 2006 danos unha idea da evolución temporal dos nutrientes inorgánicos a unha longa escala temporal (figura 2). A compoñente de variación máis importante é a compoñente de variación estacional, que supón entre o 65% da varianza no caso do nitrato de superficie e o 23% no caso do silicato de fondo (táboa 3, figura 5).

En superficie, o rango de valores para os nutrientes estudados é de 0.0-9.8 e 0.0-8.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para o nitrato e o silicato, respectivamente. Os mínimos valores de nutrientes superficiais obsérvanse asociados con períodos de máxima estratificación, ao seren consumidos polos organismos fotosintéticos (capítulo 16), mentres que os máximos superficiais se dan no mes de xaneiro debido á mestura invernal, con valores medios de 5.2 e 3.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para nitrato e silicato respectivamente.

Durante o período invernal, nesta rexión a luz limita a produción de fitoplancto, tanto polo número de horas de luz como pola pouca penetración desta no mar debido ao ángulo de incidencia ou albedo (Valdés e cols., 1991). Ademais desta limitación, debemos ter en conta as achegas continentais das augas doces con elevados niveis de nitrato e silicato, sobre todo deste último debido á natureza silíceo do solo galego (Gago e cols., 2005), aínda que é de destacar que esta estación ten unha salinidade maior de 35 no nivel de 5 m durante todos os períodos analizados, polo que a influencia das achegas continentais é reducida. En canto ás capas profundas (70 m), o patrón de comportamento estacional é case especular do observado en superficie (figura 5), con altas concentracións de nutrientes no período entre xuño e setembro con valores maiores de 6 e 4 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para nitrato e silicato, respectivamente. Isto débese tanto ao afloramento da auga subsuperficial como á remineralización do material bioxénico sedimentado desde a capa fótica. Como se aprecia nas series temporais (figura 2), os pulsos subsuperficiais de elevadas concentracións de nutrientes están asociados con baixas temperaturas ($< 13\text{ }^{\circ}\text{C}$), o que indica a procedencia subsuperficial desta auga.

Todas as series temporais consideradas, excepto a de nitrato en superficie, presentan compoñentes de variación cíclica a longo termo, mais só o silicato, tanto en superficie como no fondo, presentou ademais unha tendencia lineal significativa ascendente, de 0.056 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ no primeiro caso e de 0.085 $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ no segundo, que supoñen respectivamente o 5% e o 10% da variabilidade das series. No caso das compoñentes cíclicas, estas teñen unha periodicidade de 3.5, 4.5 ou 9 anos (táboa 3) que supoñen en conxunto entre o 5% (silicato de superficie) e o 8% (silicato de fondo) da variabilidade das series. Estes ciclos determinan que os períodos con valores máis elevados de nutrientes sexan 2002-2005 para o silicato de superficie, 1994-1995 e 2004-2005 para o nitrato no fondo e 2004-2005 para o silicato de fondo (figuras 3-4).

Finalmente, o grao de dependencia entre observacións só é significativo para as series de superficie, se ben este compoñente é marxinalmente significativo (táboa 3). Considerando todas as compoñentes de variación, os modelos univariantes explican entre o 64% (nitrato de superficie) e o 36% (silicato de fondo) da variabilidade das series.

Táboa 3. Valores dos parámetros das distintas compoñentes dos modelos univariantes da concentración de nitrato e silicato nas estacións oceanográficas: fixas da ría de Vigo (EF_RV), E3 da radial de Vigo (Ra_Vi) e E2 da radial da Coruña (Ra_Co), na superficie (5 m) e no fondo da columna da auga (40 m na EF_RV e 70 m na E3 de Ra_Vi e E2 do Ra_Co). As compoñentes do modelo aditivo univariante son: T, tendencia lineal; CE, ciclo estacional; CC, compoñentes cíclicos de longo termo; AR, compoñente autorregresiva. Os parámetros das diferentes compoñentes son: \bar{x} , media aritmética da serie; B, pendente da compoñente de tendencia lineal (taxa de cambio anual, ano⁻¹); A_i e F_i, amplitude e fase respectivamente das compoñentes cíclicas CE (primeiro e segundo harmónico do ciclo anual, i = 12 e 6 meses respectivamente) e CC (neste caso i = T, período do ciclo a longo termo); ϕ_i , parámetros da compoñente autorregresiva e o seu desfasa correspondente (k); %VE, porcentaxe da varianza explicada por cada compoñente (respecto á serie temporal completa -i. e. unha vez completados os datos na serie) e polo modelo univariante (respecto aos N datos reais da serie).

Modelo univariante	NO ₃ (superficial)			SiO ₂ (superficial)			NO ₃ (fondo)			SiO ₂ (fondo)		
	RV	Ra_Vi	Ra_Co	RV	Ra_Vi	Ra_Co	RV	Ra_Vi	Ra_Co	RV	Ra_Vi	Ra_Co
$\bar{x} + T + CE + CC + AR$	EF	E3	E2	EF	E3	E2	EF	E3	E2	EF	E3	E2
\bar{x}	3.07	2.38	2.33	4.67	2.02	1.63	5.62	7.95	6.25	6.60	4.11	2.95
B	—	—	—	—	—	0.056	—	0.170	—	—	—	0.085
%VE	—	—	—	—	—	4.7	—	4.8	—	—	—	9.9
A ₁₂	3.41	2.40	2.27	3.88	1.20	1.10	1.51	2.47	1.96	1.99	1.35	0.87
F ₁₂	5.96	6.15	5.91	6.12	6.19	6.09	2.14	2.16	1.94	1.49	1.77	1.61
%VE	53.9	41.9	59.9	49.0	30.6	35.1	28.4	38.1	30.5	48.7	17.4	21.0
A ₆	1.11	0.88	0.74	1.31	0.42	0.34	0.59	0.62	0.60	0.34	0.59	0.28
F ₆	5.30	6.07	5.46	5.57	0.20	6.05	4.01	3.88	4.53	5.22	2.77	0.11
%VE	5.7	5.6	6.3	5.6	3.8	3.4	4.3	2.4	2.9	1.40	3.3	2.2
T	—	—	—	—	78	43	108	52	54	108	78	54
A	—	—	—	—	0.48	0.41	0.68	1.10	0.66	0.69	1.20	0.37
F	—	—	—	—	3.39	4.38	1.88	4.97	2.93	0.87	3.68	4.40
%VE	—	—	—	—	4.9	4.8	5.8	7.5	3.5	5.8	13.8	3.7
T	—	—	—	—	52	—	40	—	108	—	52	43
A	—	—	—	—	0.40	—	0.76	—	0.57	—	1.34	0.37
F	—	—	—	—	4.55	—	3.86	—	1.18	—	4.65	4.80
%VE	—	—	—	—	3.4	—	7.2	—	2.6	—	17.1	3.9
$\phi(k)$	0.26 (1)	-0.33 (3)	0.15 (1)	0.21 (1)	0.27 (1)	0.21 (1)	0.25 (1)	—	—	0.20 (1)	0.42 (1)	—
$\phi(k)$	—	—	—	—	0.27 (2)	0.17 (2)	—	—	—	—	—	—
%VE	61	32	64	56	34	37	49	45	36	59	62	36
(N)	(107)	(119)	(178)	(107)	(111)	(152)	(106)	(123)	(177)	(107)	(115)	(151)
Modelo												

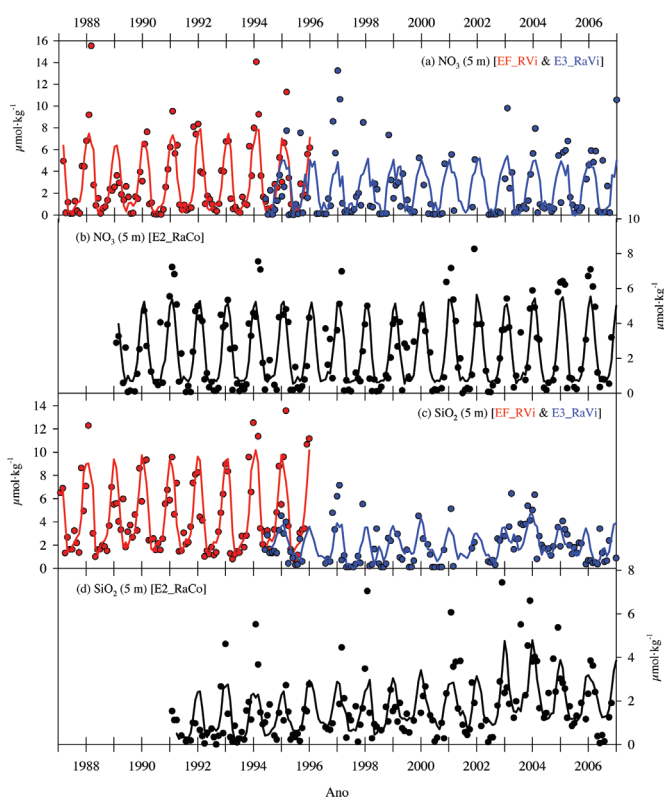


Figura 3. Series temporais e modelos (táboa 3) de nitrato e silicato en superficie. Nitrato en superficie nas estacións fixa (EF_RVi; vermello) e E3 (E3_RaVi; azul) da ría de Vigo (a) e na estación E2 fronte á Coruña (E2_RaCo; negro) (b). Silicato en superficie nas estacións fixa (EF_RVi; vermello) e E3 (E3_RaVi; azul) da ría de Vigo (c) e na estación E2 fronte á Coruña (E2_RaCo; negro) (d).

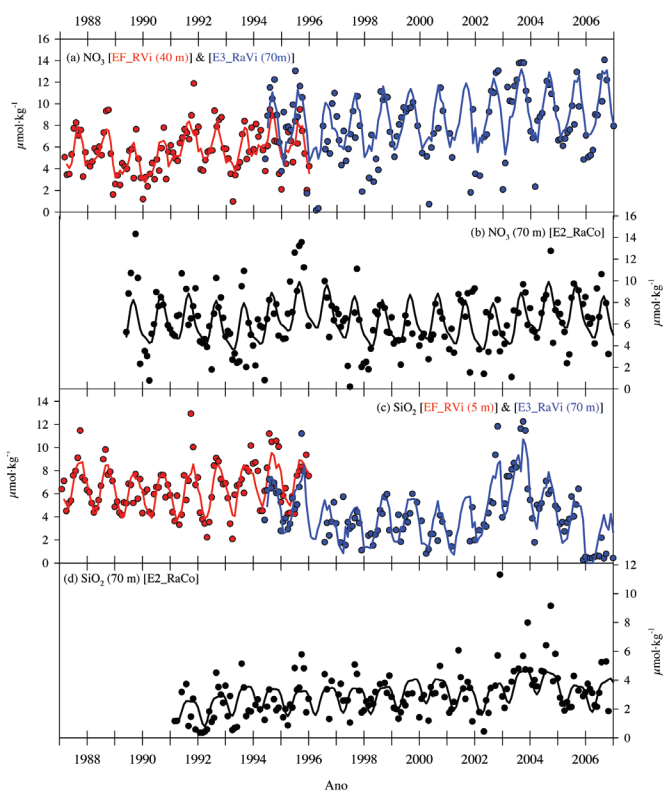


Figura 4. Series temporais e modelos (Táboa 3) de nitrato e silicato no fondo. Nitrato en superficie nas estacións fixa a 40m (EF_RVi; vermello) e E3 a 70m (E3_RaVi; azul) da ría de Vigo (a) e na estación E2 fronte a Coruña a 70m (E2_RaCo; negro) (b). Silicato en superficie nas estacións fixa a 40m (EF_RVi; vermello) e E3 a 70m (E3_RaVi; azul) da ría de Vigo (c) e na estación E2 fronte a Coruña a 70m (E2_RaCo; negro) (d).

Series temporais na ría de Vigo e na plataforma adxacente

No 1987, auspiciado polo profesor Fernando Fraga, do Instituto de Investigacións Mariñas de Vigo (CSIC), estableceuse unha estación de mostraxe na parte central da ría de Vigo (EF_RVi, figura 1) co obxecto de seguir a evolución dunha serie de variables de interese oceanográfico: variables termo-halinas, químicas (sales nutrientes) e biolóxicas (concentración de clorofila).

Debido á súa posición no interior da ría de Vigo (i.e. maior influencia das achegas continentais e maior produción biolóxica), a variabilidade estacional nesta estación difire nalgúns aspectos da atopada nas estacións situadas sobre as plataformas continentais da Coruña e Vigo (figura 5). Así, por exemplo, as amplitudes dos harmónicos do ciclo anual de nitrato e especialmente do silicato en superficie son maiores na estación da ría de Vigo que nas estacións de plataforma. Por outra banda, dado que as fases dos ditos harmónicos son similares, coa excepción do segundo harmónico do silicato de superficie na estación de plataforma fronte a Vigo, o aspecto dos ciclos anuais aseméllase (táboa 3). Os valores máis elevados de nutrientes rexístranse no inverno, coincidindo cos maiores valores de escurredura e nivel de mestura coas capas subsuperficiais e mínimos anuais de produción do fitoplancto. A partir do principio da primavera, cando o consumo por parte do fitoplancto se incrementa, a escurredura decrece e a estratificación progresa, ten lugar un acusado descenso da concentración media de nitrato e silicato. Respecto aos ciclos anuais destes nutrientes en fondo, a amplitude e o nivel medio de nitrato é superior nas estacións de plataforma que na estación da ría de Vigo, debido a unha maior influencia do afloramento nestas estacións, mentres que para o silicato a situación é á inversa, debido á maior influencia das achegas continentais no interior das rías que na plataforma adxacente. As fases son similares e, polo tanto, tamén o aspecto dos ciclos anuais, que rexistran os valores máis elevados durante os meses do verán, cando o afloramento é máis intenso, e principios do outono, cando é máis notable a influencia da mineralización da materia orgánica e, no caso da estación situada no interior da ría pola remoción dos fondos asociados á actividade marisqueira. Os ciclos estacionais na estación da ría de Vigo supoñen en calquera caso unha porcentaxe maioritaria da variabilidade, e superior que no caso das series de plataforma, que oscila entre o 60% para o nitrato de superficie e o 33% no caso do nitrato de fondo.

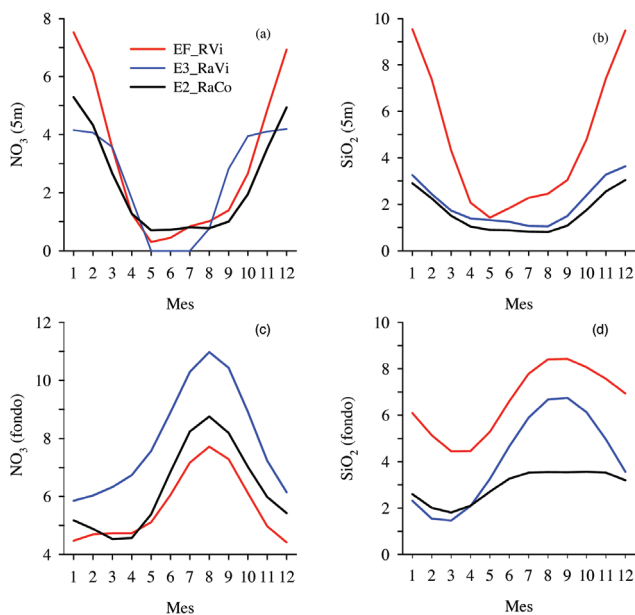


Figura 5. Ciclos estacionais de nitrato e silicato nas estacións fixas (EF_RVi) e E3 (E3_RaVi) da ría de Vigo e na estación E2 (E2_RaCo) fronte á Coruña. Nitrato en superficie (a) silicato en superficie (b), nitrato en fondo (c) e silicato en fondo (d). Nutrientes en $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Nogueira e cols. (1997) analizaron as tendencias lineais de longo termo para o período 1987-1992 na estación da ría de Vigo mediante o estimador non parámetro de tendencia τ estacional de Kendal (Van Belle e Hughes, 1984). Na táboa 4 amósase a taxa de cambio anual para as distintas variables oceanográficas. As propiedades termohalinas presentaron tendencias significativas tanto para as series de superficie como de fondo. A salinidade mostrou unha tendencia ascendente en superficie e fondo. Non obstante, en temperatura a tendencia resultou de signo contrario ($-0.08\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ e $-0.12\text{ }^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ en superficie e fondo, respectivamente) para o período estudado. No que se refire aos sales nutrientes, Nogueira e cols. (1997) non atoparon evidencias de eutrofización, aínda que os niveis de nitróxeno inorgánico disolto en superficie e os niveis de fosfato en fondo aumentaron lixeiramente. A reanálise da variabilidade a longo termo das series non contradín os devanditos resultados, xa que hai que ter en conta que o período considerado na reanálise é diferente (i.e. 1987-1996; 6 fronte a 9 anos) (táboa 3): só o nitrato e o silicato de fondo presentaron variabilidade significativa a longo termo. No caso do nitrato, esta variabilidade exprésase en compoñentes cíclicas de 9 (a extensión da serie) e 3.3 anos, que contabilizan o 13%, mentres que no caso de silicato se expresa nunha compoñente cíclica de 9 anos, que supón o 6% da variabilidade.

Na estación de plataforma, a variabilidade a longo termo de silicato retén porcentaxes significativas de variabilidade, un 8% en superficie e un 30% en fondo, en compoñentes cíclicas de 6.5 e 4.3 anos. Por outra banda, o nitrato no fondo presenta unha tendencia lineal ascendente significativa (5% da variabilidade) de $0.17\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, e unha compoñente cíclica de 4.3 anos (5% da variabilidade).

A compoñente de variabilidade a curto termo (i.e. autorregresivo) na estación da ría de Vigo é máis importante que no caso da estación de plataforma fronte á Coruña (táboa 3), o que indica unha maior inercia do sistema. Tamén é así no caso da plataforma fronte a Vigo, excepto para o nitrato de fondo. Os modelos univariantes explican entre o 60% (nitrato de superficie na estación da ría e silicato de fondo na de plataforma) e o 32% (nitrato de superficie en plataforma) da variabilidade das series.

Variabilidade da capa de mestura invernal

O elevado contido en nutrientes inorgánicos que presenta a auga subsuperficial aflorada, ACNAE, depende principalmente do contido en nutrientes no momento de formación e dos posteriores procesos de remineralización da materia orgánica. O coñecemento dos niveis de nutrientes durante o momento de formación da ACNAE dáunos unha idea da capacidade de fertilización da auga subsuperficial e, polo tanto, establece un límite da posible produción nova do sistema; é dicir, da produción debida á achega de nutrientes desde fóra da capa fótica. Canto maior sexa a concentración de nutrientes no momento de formación, maior será a capacidade de fertilización da auga subsuperficial, o que favorecerá un incremento da produción primaria do sistema sempre que se dean as condicións de iluminación e estabilidade apropiadas para o fitoplancto.

As costas galegas están localizadas na rexión de formación de ACNAE. As augas subsuperficiais orixínanse durante a época invernal, momento en que, dado o arrefriamento atmosférico, se produce unha perda de calor e a auga superficial é máis densa que a inmediatamente inferior (situación inestable), orixinándose a mestura destas. Ao longo do bordo oriental do Atlántico norte, ao leste da dorsal mesoatlántica, existe un gradiente meridional en profundidade de capa de mestura. As capas de mestura máis profundas atópanse localizadas cara ao norte, debido a unhas condicións invernales máis drásticas. Estudos previos (Castro, 1997; Pérez e cols., 2001) mostran

que, canto máis profunda sexa a capa de mestura invernal, maior é o contido de nutrientes de ACNAE formada recentemente. A convección invernal profunda introduce concentracións altas de nutrientes na capa superficial que, posteriormente, quedarán illadas pola formación da termoclina estacional. A campaña GALICIA VII realizouse en febreiro-marzo de 1984, momento da mestura invernal. As capas de mestura máis profundas localízanse en latitudes máis setentrionais, cun acusado gradiente no 43° N (figura 6). Estas capas de mestura profundas están asociadas coa ACNAE de menor temperatura, mentres que as capas de mestura de menor profundidade (< 200 m) corresponden con augas de temperaturas > 13 °C. A distribución da concentración de nutrientes na capa de mestura responde a unha pauta similar á da temperatura, existindo unha alta correlación entre elas ($R^2 = 0.91$ e 0.82 para nitrato fronte a temperatura e silicato fronte a temperatura, respectivamente). A medida que aumenta o grosor da capa de mestura e diminúe a temperatura, os niveis de nutrientes medran. Nas posicións máis meridionais atopamos os menores niveis de nutrientes ($1.20 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitrato, $1.40 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de silicato), mentres que os valores máis altos ($9.50 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitrato, $3.49 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de silicato) se localizan a 47° N, onde se acada o máximo en profundidade de capa de mestura, ~500 m con temperatura ~10.6 °C.

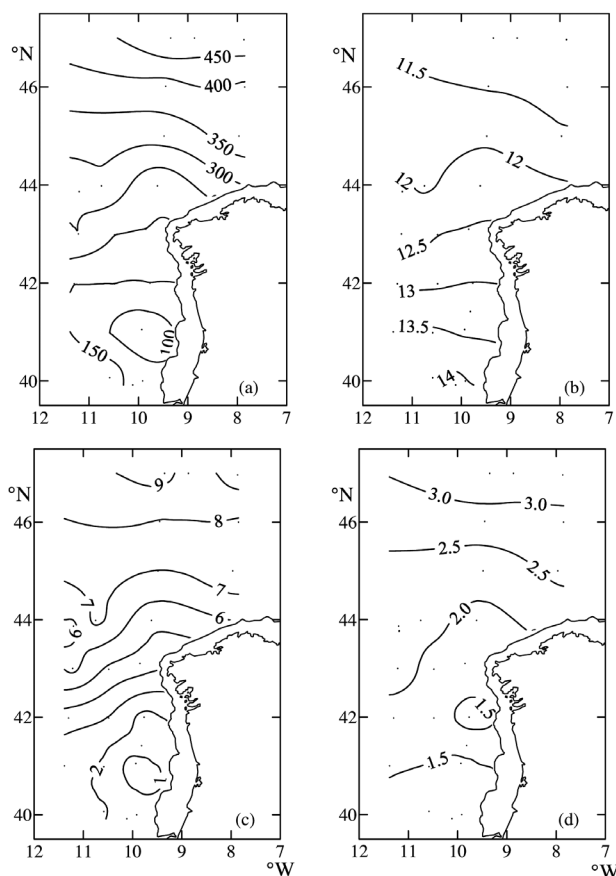


Figura 6. Distribución espacial da profundidade (a), temperatura (b), concentración de nitrato (c) e concentración de silicato (d) na capa de mestura observada na campaña GALICIA VII (febreiro de 1984). Profundidade en m, temperatura en °C e sales nutrientes en $\mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$.



Lamentablemente, como veremos con máis detalle no punto seguinte, o número de campañas oceanográficas con medición simultánea das variables termohalinas e químicas (nutrientes, osíxeno, pH, alcalinidade) é moi limitado, máxime se nos restrinximos á época invernal. Polos datos de ICOADS para o mes de marzo, período en que se acada o mínimo de temperatura atmosférica e, polo tanto, período de mestura oceánica invernal, sabemos que a temperatura mínima en marzo aumentou en 0.6 ± 0.2 °C e 0.9 ± 0.2 °C en 42° N e 45° N respectivamente, durante os últimos 40 anos (figura 7). Tendo en conta este aumento e considerando que a variación de nitrato coa temperatura no momento da mestura invernal é de $2.9 \mu\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, estimamos que a tendencia é cara unha diminución do nitrato no momento de formación de aproximadamente 44% e 31% en 42° N e 45° N, respectivamente.

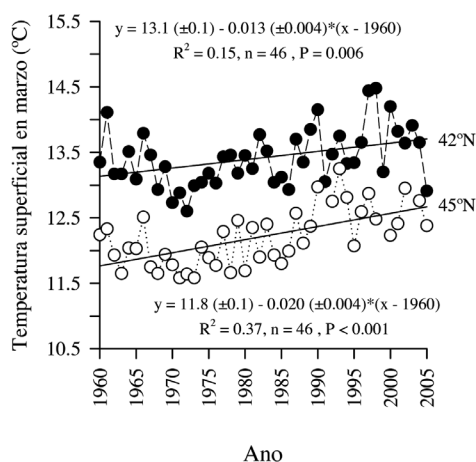


Figura 7. Temperaturas superficiais medias para o mes de marzo usando datos do ICOADS.

Variabilidade temporal da concentración de nutrientes na ACNAE

No capítulo 13 realizouse un estudo da variabilidade temporal das propiedades termohalinas na ACNAE ao nivel isopícnico de 27.1 segundo datos recollidos entre 1900 e 2006. O estudo desta serie temporal non amosou ningunha tendencia linear significativa. Trátase agora de saber como é a variabilidade nas propiedades químicas da ACNAE que se localiza no océano adxacente ás costas galegas. É importante destacar que nos centramos só na variabilidade temporal das propiedades químicas de ACNAE no dominio oceánico, non considerando o dominio costeiro, onde a ACNAE sofre intensos procesos de oxidación da materia orgánica na súa caída desde os primeiros metros da columna de auga.

A base de datos recompilada para esta análise está composta por 19 campañas oceanográficas que abarcan un período de aproximadamente 27 anos, entre outubro de 1977 ata febreiro de 2005 (táboa 1). Das 19 campañas, 6 foron realizadas entre 1997 e 1998 dentro do proxecto europeo OMEX-II (Ocean Margin Exchange Processes), o cal pon de manifesto que só co esforzo colectivo dun gran número de organismos é posible levar a cabo este tipo de investigacións. Estacionalmente un 60% das observacións foron realizadas durante a época de afloramento, entre os meses de abril a setembro.

A análise integral dos datos mostra que ao nivel isopícnico de 27.1, as concentracións de nutrientes de ACNAE seguen unha variación temporal similar á das propiedades termohalinas (figura 8). De feito, atopamos unha correlación significativa entre as series temporais dos nutrientes e as propiedades termohalinas ($R^2 = 0.37$; 0.37 e 0.29 para nitrato, fosfato e silicato respectivamente). Os valores máis altos de nutrientes acadáronse nos períodos entre 1984-1988 e a partir de 1998, asociados con mínimos de temperatura e salinidade. As concentracións máis baixas, entre os anos 1991-1993, corresponden con valores máximos nas propiedades termohalinas. Aínda que para o período 1977-2005 atopamos unha tendencia significativa ao quentamento/salinización da ACNAE para o nivel isopícnico de 27.1, no que respecta ás concentracións de nutrientes non hai evidencia dun incremento destas para o período estudado.

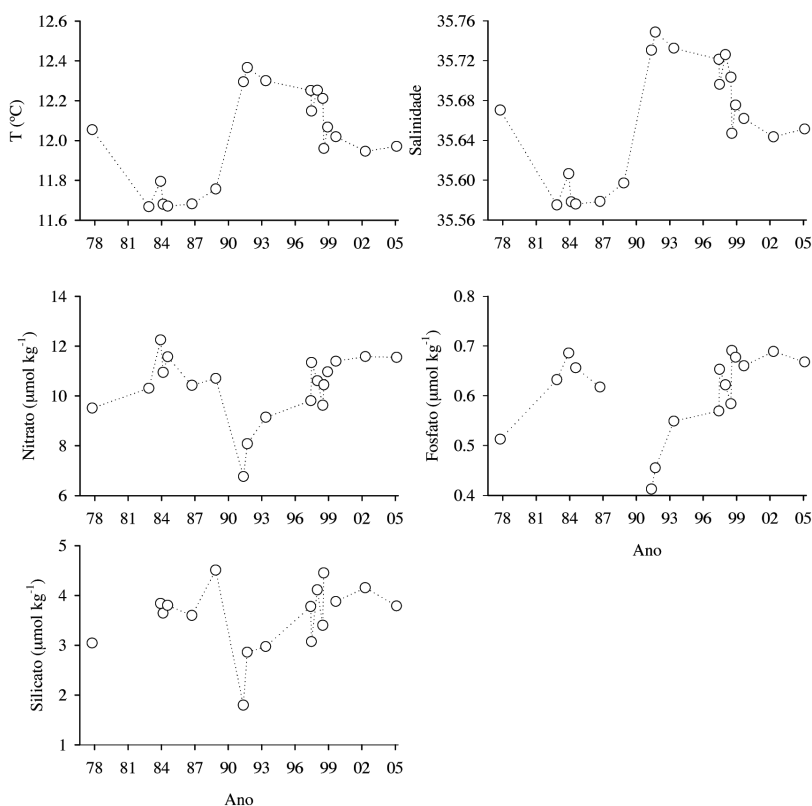


Figura 8. Evolución temporal das variables termohalinas e químicas para ACNAE ao nivel isopícnico de 27.1.

Fertilización: efectos na produción do sistema

De marzo-abril a setembro-outubro, cando en Galicia predominan os ventos do nordeste (véxase o capítulo 13), o afloramento da ACNAE, fría e cargada de sales nutrientes, constitúe o principal mecanismo de fertilización do sistema formado polas rías e a plataforma continental adxacente (Álvarez-Salgado e cols., 2002; Arístegui e cols., 2006). No caso particular das Rías Baixas, o 99.4% da auga que circula por elas durante o período favorable ao afloramento é a ACNAE transportada pola corrente de fondo, que se dirixe desde a plataforma ao interior das rías (véxase o capítulo 14). O 97.3% dos sales nutrientes que fertilizan as Rías Baixas entran con esa corrente de fondo (Álvarez-



Salgado e cols., 2008); un 60% dos sales nutrientes consómensse netamente para producir materia orgánica e o 40% restante expórtase na corrente superficial de saída cara á plataforma (Pérez e cols., 2000), onde son completamente consumidas para producir máis materia orgánica (Aristegui e cols., 2006; Álvarez-Salgado e cols., 2008). Aproximadamente 1/3 da materia orgánica producida nas rías expórtase na corrente superficial de saída en forma de partículas susceptibles de sedimentar e descompoñerse na columna de auga e nos sedimentos da plataforma para producir novamente sales nutrientes. De feito, a metade dos sales nutrientes que transporta a ACNAE que entra nas rías durante o período favorable ao afloramento procede dos procesos de descomposición de materia orgánica que ocorren na plataforma. Polo tanto, parte dos sales nutrientes que fertilizan as rías veñen da descomposición da materia orgánica que se exporta desde as propias rías, de xeito que se consegue unha grande eficacia na utilización deses sales no sistema formado polas rías e a plataforma: Aristegui e cols. (2006) estimaron que cada átomo de nitróxeno que entra desde o océano no sistema formado polas rías e a plataforma reutilízase ata cinco veces para producir materia orgánica antes de retornar de novo cara ao océano. En comparación, noutros sistemas de afloramento, nos que non hai rías, cada átomo de nitróxeno só se emprega dúas veces. No contexto do cambio climático, o descenso significativo que se observou tanto na extensión do período no que predominan os ventos do nordeste como na súa intensidade media nos últimos 40 anos (véxase capítulo 13), ten un efecto directo sobre a fertilización do sistema formado polas rías e a plataforma, mais afectando de forma distinta a súa produtividade, dado que as rías reciben máis sales nutrientes dos que poden procesar mentres que na plataforma se observa limitación.

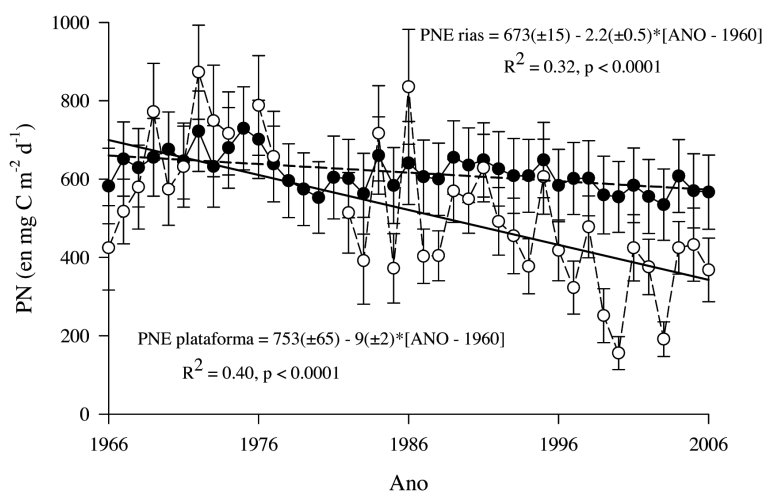


Figura 9. Evolución temporal da produción neta do ecosistema (PNE) da ría de Arousa (círculos negros) e da plataforma continental adxacente (círculos brancos) mediado sobre o período favorable ó afloramento entre 1966 e 2006.

Tendo en conta a evolución temporal da produción neta (PN) para o período de ventos favorables ao afloramento, a PN media (± 1 desviación estándar) da ría de Arousa foi de $618 \pm 47 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ fronte aos $512 \pm 176 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ atopados na plataforma (figura 9). Tanto na ría como na plataforma adxacente obsérvase un descenso moi significativo ($P < 0.0001$) da PN, dun 13% no caso da ría e un 52% no caso da plataforma entre 1966 e 2006. A notable diferenza de comportamento entre as rías e a plataforma adxacente débese ao feito de que: i) a ACNAE que entra nas rías ten o dobre de concentración de sales nutrientes que a ACNAE que se atopa no océano adxacente debido aos intensos procesos de rexeneración que ocorren na plataforma (Aristegui e cols., 2006; Álvarez-Salgado

e cols., 2008); e ii) as rías só consomen parte dos sales nutrientes que reciben (Pérez e cols., 2000). Consecuentemente, mentres as rías sigan a recibir máis sales nutrientes dos que son capaces de procesar, a PN non caerá de xeito drástico. O progresivo descenso da intensidade dos ventos favorables ao afloramento, ao tempo que reduce a entrada de sales nutrientes nas rías, está a incrementar o tempo de renovación destes ecosistemas (capítulo 14) de xeito que o fitoplancto dispón de máis tempo para utilizar máis eficientemente eses sales nutrientes. Pola contra, cando se considera o conxunto rías-plataforma, a entrada de sales nutrientes desde o océano é menor que nas rías e a auga reside suficiente tempo na plataforma como para que eses sales nutrientes se esgoten.

Acidificación

O uso global de combustibles fósiles está cambiando rapidamente a composición de gases traza na atmosfera. Estes gases de efecto invernadoiro xogan un papel crítico controlando o clima terrestre porque incrementan a opacidade infravermella do oceano causando o quentamento da superficie planetaria. O dióxido de carbono (CO_2) é o gas invernadoiro máis importante, contribuíndo aproximadamente co 60% do cambio total do forzamento radiativo debido á perturbación antrópica. Ao inicio da década actual, o CO_2 liberado á atmosfera pola queima de combustibles fósiles e a fabricación de cemento medrara por riba de 7 Pg C por ano ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g} = 1 \text{ mil millóns de toneladas}$) (Marland e cols., 2005). Desta cantidade, aproximadamente 3 Pg C do chamado CO_2 antrópico (CANT) acumúlase na atmosfera. As restantes 4 Pg C son secuestradas pola biosfera terrestre e o océano global. Onde e como estes importantes sumidoiros (océano e biosfera terrestre) varían a súa captura de CANT ano tras ano é o obxectivo de moitas das investigacións científicas en marcha (Prentice, 2001). É crítico comprender este repartimento, xa que o océano se considera como un sumidoiro de CANT de longo termo mentres que o sumidoiro terrestre é máis inconstante.

Desde a era preindustrial ata a actualidade, a concentración de CO_2 na atmosfera foise incrementando de 274 a 378 ppm. O fluxo de intercambio de CO_2 entre a atmosfera e o océano reduciu a acumulación de CO_2 atmosférico desde unha concentración total de 453 ppm ao valor real de 378 ppm. De feito, o océano acumulou arredor do 31% de CANT. Doutra banda, o océano ten a capacidade de amortecer os cambios climáticos pola súa grande capacidade de acumular e transportar calor. Nos tres metros superficiais do océano acumúlase o mesmo contido térmico que en toda a atmosfera, e todo o CO_2 atmosférico equivale ao CO_2 contido no océano nunha capa de tres metros profundidade. O océano xoga, polo tanto, un dobre papel no complexo sistema climático ao amortecer e disipar o efecto do CANT.

Estes feitos teñen importantes efectos secundarios. Primeiro, a capacidade de continuar capturando CANT diminúe cando a concentración de CANT aumenta. Segundo, o CANT gañado polo océano fai que o equilibrio ácido-base se desprace a condicións máis ácidas. Actualmente o pH da capa superficial da atmosfera descendeu arredor de 0.1 unidades, e espérase un descenso de ata 0.5 en 2100. Esta acidificación do océano diminúe a saturación de CaCO_3 e ameaza os organismos mariños (Gazeau e cols., 2007). Estes autores rexistraron en experimentos de laboratorio descensos na calcificación do mexillón (*Mytilus edulis*) de ata un 25% cando este organismo se somete a niveis de CO_2 atmosférico de 750 ppm que son as previstas para 2100 polo Intergovernmental Panel on Climate Change (escenario IS92a; IPCC 2008)

O descenso de pH debido ao incremento de CANT na capa de 100-700 metros progresa moi próximo ao esperado na capa superficial do océano, que evoluciona seguindo en equilibrio coa atmosfera (figura 10). Isto indica que a captación nos primeiros 700 metros de columna de auga acumula niveis



de CANT para cada ano moi similares aos esperados tendo en conta a taxa de captación de CO_2 anual en superficie, asumindo equilibrio de CO_2 entre a capa de mestura e a atmosfera. Porén, en capas máis profundas, os ritmos de acidificación son moito máis lentos debido ao longo tempo transcorrido desde a formación da masa de auga, e consecuentemente contén valores de CANT adquirido en décadas pasadas.

Os descenso actuais de pH na capa superficial indican un aumento da solubilidade de CaCO_3 dun 16% respecto ás condicións existentes na época preindustrial. Deste aumento da solubilidade, case a metade (7%) foi producido desde 1977 ata 2006. O incremento de temperatura tamén afecta á solubilidade CaCO_3 , pero os aumentos de temperatura previstos van ter moi pouco impacto. Outro dos factores que tamén debe ser considerado é o posible descenso de pH por un aumento da eutrofización dos ecosistemas costeiros que aínda non foi posible avaliar. Convén destacar que a variabilidade de pH nas rías é de 0.25 unidades de pH (Gago, 2000).

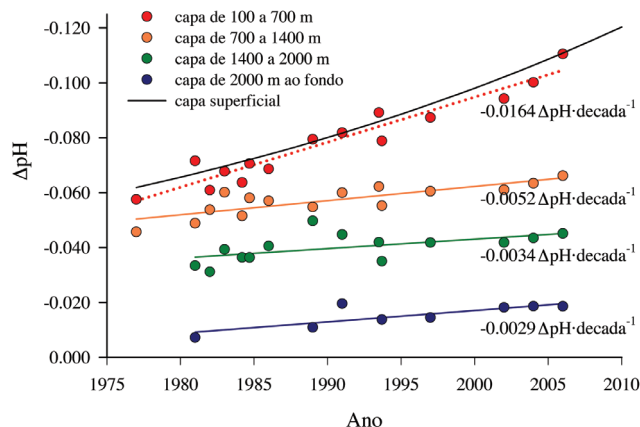


Figura 10. Evolución temporal dos valores medios da variación do pH (ΔpH) debido á captura de CANT en distintas capas oceánicas para a área xeográfica que abarca desde a península Ibérica ao meridiano 20°W , e desde 36°N a 43°N .

Táboa 4. Taxa de cambio anual da tendencia estimada mediante o estimador non parámetrico estacional de Kendall. Móstranse só os datos con tendencia significativa ($P < 0.05$). Sup: superficie; Fon: fondo. NID: nitróxeno inorgánico disolto.

Variable		1987 - 1992
Salinidade	Sup.	+0.20
	Fon.	+0.05
Temperatura	Sup.	-0.08
	Fon.	-0.12
Nitrato	Sup.	-
	Fon.	-
NID	Sup.	0.38
	Fon.	0.04
Fosfato	Sup.	0.04
	Fon.	0.03
Silicato	Sup.	-0.16
	Fon.	-0.19

CONCLUSIÓNS

O estudo das series temporais das estacións oceanográficas situadas fronte á Coruña, no interior da ría de Vigo e na plataforma adxacente fronte a ría de Vigo mostra que só a concentración de silicato, tanto en superficie como en fondo fronte A Coruña, e a concentración de nitrato en fondo na plataforma adxacente fronte a ría de Vigo, mostran unha tendencia lineal de longo termo.

Así mesmo, a partir da serie temporal baseada nas campañas oceanográficas realizadas no océano adxacente ás costas galegas entre 1977 e 2005, tampouco atopamos unha tendencia de variabilidade temporal nas concentracións de nutrientes inorgánicos para o nivel isopícnico de 27.1 kg m^{-3} . Porén, a análise da serie temporal de temperatura superficial para o mes de marzo da base de datos ICOADS indica unha diminución da capa de mestura invernal que se traduce nunha diminución da concentración dos niveis de nitrato de $1.8 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ para o período entre os anos 1977 e 2005. A avaliación conxunta destes resultados apunta un incremento nas taxas de remineralización oceánica. Un incremento dos niveis de nutriente rexenerado no océano adxacente amortecería o posible descenso asociado á diminución da capa de mestura invernal, non observándose variabilidade temporal na concentración de nutrientes no océano adxacente.

A partir das relacións paramétricas obtidas por Pérez e cols. (2000) e Álvarez-Salgado e cols. (2002) entre o transporte de Ekman e a produción neta de materia orgánica para o período de afloramento, fixemos a reconstrución da utilización neta de sales nutrientes no sistema rías-plataforma nos últimos 40 anos. A análise destes resultados amosa que tanto nas rías como na plataforma adxacente estaríase a producir unha diminución da produción neta, dun 52% na plataforma mentres que nas rías diminuíría só o 13%. O menor descenso nas rías que na plataforma é debido a que o descenso dos ventos de compoñente norte, aínda que ocasiona un descenso do nutriente que aflora na plataforma, por outra banda, aumenta o tempo de renovación das rías de xeito que o fitoplancto dispón de máis tempo para utilizar máis eficientemente os sales nutrientes.

Só tendo en conta a captura de CO_2 antrópico na área de estudo se pode observar unha diminución do pH en toda a columna de auga. Nos primeiros 700 metros da columna de auga é onde o descenso de pH é maior e dentro do rango esperado, tendo en conta a taxa de captación anual de CO_2 na superficie oceánica.

AGRADECEMENTOS

O noso recoñecemento para os investigadores e técnicos que impulsaron a obtención de datos de variables químicas nas augas mariñas galegas e o mantemento das series de datos empregadas neste estudo. Especialmente queremos destacar o labor de Fernando Fraga (Instituto de Investigación Mariñas de Vigo) e de Nicolás González (Instituto Español de Oceanografía, A Coruña) polo seu esforzo persoal e estímulo no traballo cotián. As determinacións dos nutrientes nas estacións costeiras de Vigo e A Coruña mantidas polo Instituto Español de Oceanografía foron feitas por C. Carballo, dentro do programa RADIALES. Esta análise das tendencias bioxeoquímicas en Galicia foi financiada parcialmente pola Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible da Xunta de Galicia (Programa CLIGAL).



BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez M., Ríos A. F., Pérez F. F., Bryden H. L. and Rosón G. (2003). Transports and budgets of total inorganic carbon in the subpolar and temperate North Atlantic. *Global Biogeochemical Cycles*, **17** (1), 1002, doi:10.1029/2002GB001881.
- Álvarez-Salgado X. A., Castro C. G., Pérez F. F. and Fraga F. (1997). Nutrient mineralization patterns in shelf waters of the Western Iberian upwelling. *Continental Shelf Research*, **17** (10), 1247-1270.
- Álvarez-Salgado X. A., Beloso S., Joint I., Nogueira E., Chou L., Pérez F. F., Groom S., Cabanas J. M., Rees A. P. and Elskens M. (2002). New production of the NW Iberian shelf during the upwelling season over the period 1982-1999. *Deep Sea Research I*, **49**, 1725-1739.
- Álvarez-Salgado X. A., Borges A. V., Figueiras F. G. and Chou L. (2008). Iberian margin: the Rías. In: *Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis*, K.-K. Liu, L. Atkinson, R. Quiñones and L. Talaue-McManus (eds.), Springer-Verlag, New York, in press.
- Arhan M., Billant A., Colin de Verdière A., Mémery L. and Tréguer P. (1991). CTD-O₂ and nutrients along the Eastern Boundary of the North Atlantic Ocean from 60°N to 20°N. *Campagnes Océanographiques Françaises*, **13**.
- Arístegui J., Álvarez-Salgado X. A., Barton E. D., Figueiras F. G., Hernández-León S., Roy C. and Santos A. M. P. (2006). Oceanography and fisheries of the Canary Current Iberian region of the Eastern North Atlantic. In: *The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Syntheses (The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas, Vol. 14)*, A.R. Robinson and K. Brink (eds.), Harvard University Press, pp. 877-931.
- Box G. E. P. and Jenkins G. M. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*, 2nd edn, Ed. Holden-Day, San Francisco.
- Caldeira K. and Wickett M. E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, **425**, 365.
- Casas B., Varela M., Canle M., González N. and Bode A. (1997) Seasonal variations of nutrients, seston and phytoplankton, and upwelling intensity off La Coruña (NW Spain). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **44**, 767-778.
- Castro C. G., Pérez F. F., Álvarez-Salgado X. A., Rosón G. and Ríos A. F. (1994). Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician Coast (NW Spain). *Journal of Geophysical Research*, **99**, 5135-5147.
- Castro C. G. (1997). *Caracterización química del agua subsuperficial del Atlántico Nororiental y su modificación por procesos biogeoquímicos*. Tese de doutoramento, Universidade de Santiago, 244pp.
- Castro C. G., Pérez F. F., Álvarez-Salgado X. A. and Fraga F. (2000). Coupling between the thermohaline, chemical and biological fields during two contrasting upwelling events off the NW Iberian Peninsula. *Continental Shelf Research*, **20**, 189-210.
- Castro C. G., Nieto-Cid M., Álvarez-Salgado X. A. and Pérez F. F. (2006). Local remineralization patterns in the mesopelagic zone of the Eastern North Atlantic off the NW Iberian Peninsula. *Deep-Sea Research I*, **53**, 1925-1940.

- Castle R., Wanninkhof R., Doney S. C., Bullister J., Johns L., Feely R. A., Huss B. E. and Millero F. J., Lee K. (1998). Chemical and hydrographic profiles and underway measurements from the North Atlantic during July and August of 1993. NOAA Data Report ERL AOML-32, Springfield NJ, NOAA/AOML.
- FAO Fisheries (1997). *Review of the state of World Fisheries Resources: Marine Fisheries Resource Service*. Fishery Resources División, Fisheries Dept., Rome.
- Fraga F., Mouriño C., Pérez F. F., Ríos A. F. y Marrase C. (1985). Campaña Galicia VII. Datos básicos. *Datos Informativos Instituto de Investigaciones Pesqueras*, 12, 50 pp.
- Fraga F., Figueiras F. G., Prego R., Pérez F. F. y Ríos A. F. (1987). Campaña Galicia IX Oceánica. Datos básicos. *Datos Informativos Instituto de Investigaciones Pesqueras*, 20, 148 pp.
- Gago J. M. (2000). *Transformaciones biogeoquímicas y flujos de carbono en la Ría de Vigo. Estudio de la variación estacional y corta escala*. Tese de doutoramento, Universidade de Vigo, Spain.
- Gago J., Álvarez-Salgado X. A., Nieto-Cid M., Brea S. and Piedracoba S. (2005). Continental inputs of C, N, P and Si species to the Ría de Vigo (NW Spain). *Estuarine, coastal and shelf science*, **65**, 74-82.
- Gazeau F., Quiblier C., Jansen J. M., Gattuso J. P., Middelburg J. J., and Heip C. H. R. (2007). Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. *Geophysical Research Letters*, **34**, L07603, doi:10.1029/2006GL028554.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2008). *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 193 pp.
- Labarta U. (2000). *La acuicultura en Galicia. A Economía galega*. Serie informes anuais nº 14, Informe 1998/1999. Fundación Caixa Galicia. CIEF Centro de Investigación económica y financiera.
- Lherminier P., Mercier H., Gourcuff C., Álvarez M., Bacon S., and Kermabon C. (2007). Transports across the 2002 Greenland-Portugal Ovide section and comparison with 1997, *Journal of Geophysical Research*, **112**, C07003, doi:10.1029/2006JC003716.
- Manríquez M., Mouriño C. y Fraga F. (1978). Campaña Galicia IV. Datos básicos. *Resultados expediciones científicas*, 7, 195-240.
- Marland G., Boden T. A. and Andrés R. J. (2005). *Global, Regional, and National Fossil Fuel CO₂ Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Mitchell B. G. and Holm-Hansen O. (1991). Observations and modeling of the Antarctic phytoplankton crop in relation to mixing depth. *Deep-Sea Research*, **38**(8/9): 981-1007.
- Mouriño C., Pérez F. F., Ríos A. F., Manríquez M., Estrada M., Marrase C., Prego R. y Fraga F. (1985). Campaña Galicia VIII. Datos básicos. *Datos Informativos Instituto de Investigaciones Pesqueras*, 13, 108 pp.
- Mouriño C., Pérez F. F., Ríos A. F. y Fraga F. (1984). Campaña Galicia V. Datos básicos. *Datos Informativos Instituto de Investigaciones Pesqueras*, 10, 29-61.



- Nogueira E. (1998). *Análisis y modelado de la variabilidad temporal de las características hidrográficas en la ría de Vigo*. Tese de doutoramento, Universidade de Vigo. 238 pp.
- Nogueira E. and Figueiras F.G. (2005) The microplankton succession in the Ría de Vigo revisited: Species assemblages and the role of weather-induced, hydrodynamic variability *Journal of Marine Systems*, **54** (1-4 SPEC. ISS.), 139-155.
- Nogueira E., Pérez F. F. and Ríos A. F. (1997). Seasonal Patterns and Long-term Trends in an Estuarine Upwelling Ecosystem (Ría de Vigo, NW Spain). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **44**, 285-300.
- Nogueira E., Pérez F. F. and Ríos A. F. (1998). Modelling nutrients and chlorophyll a Time Series in an estuarine upwelling ecosystem (Ría de Vigo: NW Spain) using the box-jenkins approach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **20**, 267-286.
- OMEX project: Ocean Margin Exchange. <http://www.bodc.ac.uk/projects/european/omex/>
- Pérez F. F., Álvarez-Salgado X. A., and Rosón G. (2000). Stoichiometry of nutrients (C, N, P and Si) consumption and organic matter production in a coastal inlet affected by upwelling. *Marine Chemistry*, **69**, 217-236.
- Pérez F. F. e colaboradores. (1995). Mapping of thermohaline and chemical variables during a poleward event off the Iberian Peninsula. *MORENA Scientific and Technical Report*, **24**, 73 pp.
- Pérez F. F., Ríos A. F., Fraga F. y Mouriño C. (1985). Campaña Galicia VI. Datos básicos. *Datos Informativos Instituto de Investigaciones Pesqueras*, **11**, 38 pp.
- Pérez F. F., Castro C. G., Álvarez-Salgado X. A. and Ríos A. F. (2001). Coupling between the Iberian basin-scale circulation and the Portugal boundary current system: a chemical study. *Deep-Sea Research I*, **48**, 1519-1533.
- Pollard R. T., Leach H. and Griffiths G. (1991). *RRS Charles Darwin Cruises 58 & 59 25 April-16 May; 18 May-10 Jun 1991 Vivaldi'91*. Institute of Oceanographic Sciences Deacon Laboratory, report no. 228, 49 pp.
- Poularikas A. D. and Seely, S. (1991). *Signals and Systems*, 2nd edn, Boston PWS-KENT.
- Prentice I. C., Farquhar G. D., Fasham M. J. R., Goulden M. L., Heimann M., Jaramillo V. J., Keshgish H. S., LeQuéré C., Scholes R. J. and Wallace, D. W. R. (2001). The carbon cycle and atmospheric CO₂. In: *Climate Change: The Scientific Basis*. Contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J. Houghton, and D. Yihui (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ríos A. F., Pérez F. F. and Fraga F. (1992). Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. *Deep-Sea Research*, **39** (3/4), 645-658.
- Ríos A. F., Pérez F. F. and Fraga F. (2001). Long-term (1977-1997) measurements of CO₂ in the eastern North Atlantic: evaluation of anthropogenic input. *Deep-Sea Research II*, **48**, 2227-2239.
- SCOR. (1990). *Oceans, carbon and climate change: an introduction to the Joint Global Ocean Flux Study*. Scientific Committee on Oceanic Research, Halifax, Canada, 61 pp.
- Strayer D., Glitzenstein J. S., Jones C. G., Kolasoi J., Likens G. E., McDonnell M.J., Parker G. G. and Pickett S. T. A. (1986). Long-term ecological studies: an illustrated account of their design, operation, and importance to ecology. *Millbrook, NY: Occasional Publication of the Institute of Ecosystem Studies*, No2.

- Strickland J. D. H. e Parsons R. (1972). A practical Handbook on seawater análisis. *Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada*, 2nd edn, 310pp.
- Teira E, Nieto-Cid M, Álvarez-Salgado X.A. (in press). Bacterial community composition and optical properties of dissolved organic matter in the coastal transition zone of NW Iberian Peninsula during the downwelling season. *Aquatic Microbial Ecology*.
- Transient Tracers in the Ocean, North Atlantic Study, Shipboard Physical and Chemical Data Report 1*. April-19 October (1981). Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego, USA.
- Valdés L., Álvarez M. T., Lavín A., Varela M. y Carballo R. (1991). Ciclo anual de parámetros hidrográficos, nutrientes y plancton en la plataforma continental de La Coruña (NO, España). *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, **7**(1), 91-138.
- van Belle G. and Hughes J. P. (1984). Non parametric tests for trend in water quality. *Water Resources Research*, **20**, 127-136.
- Vázquez-Rodríguez M., Padín X. A., Pérez F. F., Ríos A. F. and Bellerby R. G. J. (2008). Anthropogenic carbon determination from sub-surface boundary conditions. *Marine Chemistry*, Submitted.
- Wei W. W. S. (1989). Time Serie Analysis: Univariate and Multivariate Methods, Addison Wesley

