



Como os cambios no vento afectan ao potencial produtivo das rías galegas

Padin¹ X.A., Pazos² Y., Gilcoto¹ M., Cabanas³ M., Pardo¹ P.C., Doval² M.D., Farina⁴ L., Pérez¹, F.F.

¹Instituto de Investigacións Mariñas, CSIC, Eduardo Cabello, 6, Vigo, España.
padin@iim.csic.es

²Instituto Tecnolóxico para o Control do Medio Mariño de Galicia, Peirao de Vilaxoan, 36611, Vilagarcía de Arousa, España.

³Centro Oceanográfico de Vigo, Instituto Español de Oceanografía, Cabo Estay, 36200, Vigo, España.

⁴Facultade de Ciencias del Mar, Universidade de vigo, Campus de Lagoas-Marcosende, 36310, Vigo, España.

Resumo

As rexións de afloramento costeiro, unhas das áreas máis produtivas dos océanos, estanse vendo afectadas pola variabilidade dos ventos no marco do cambio climático. Ao contrario da hipótese xeral que predí un fortalecemento xeral do afloramento costeiro, a análise de series temporais dos ventos no litoral galego entre o 1965 e o 2006 apuntan a unha diminución do afloramento costeiro que está asociado a un cambio no patrón das isobaras durante o verán. O debilitamento do afloramento ten importantes consecuencias tanto para os ecosistemas costeiros como para a explotación dos seus recursos. A plataforma costeira amosou unha perda significativa da súa produción do 52% ao longo dos últimos 40 anos, que explica o 50% das variacións interanuais das capturas de sardiña ao longo do mar Cantábrico. A menor fertilización no interior das rías, asociada á menor chegada de nutrientes polo afloramento, foi compensada polo aumento de procesos de remineralización *in situ* da materia orgánica, asociados a un maior tempo de residencia. O incremento do tempo de renovación das augas

nas rías xunto co quencemento superficial aumentaron a estratificación da columna de agua e afectaron á sucesión fitoplanctónica cun aumento da porcentaxe de dinoflaxelados e unha diminución das diatomeas totais. A maior presenza de dinoflaxelados, organismos formadores de biotoxinas, reduce os períodos de extracción do mexillón nas rías galegas.

Palabras clave

Cambio climático, ecosistema costeiro, afloramento costeiro, sucesión fitoplanctónica, HABs.

Introdución

O cambio climático ven sendo tema central de estudo en distintos eidos para moitas institucións e organismos de investigación durante as últimas décadas. Este esforzo intensifícouse nos últimos anos a través de diferentes programas e proxectos como resposta ao crecente interese na orixe e impactos desta mudanza, especialmente na súa relación coas emisións de CO₂ derivadas das actividades humanas. A contribución antropoxénica ao cambio global necesariamente debe ser incluída nas políticas futuras, tanto medioambientais como socioeconómicas, para minimizar a pegada das emisións de CO₂ sobre o planeta.

Con todo, o clima é variable por natureza e así foi documentado en numerosos estudos. Análises do aire retido no xeo da Antártida amosan a existencia de fortes oscilacións de temperatura (Barnola *et al.*, 1987), que se estenden máis alá do medio millón de anos. Esta transición entre épocas frías e cálidas, coñecidas como períodos glaciares e interglaciares, respectivamente, obsérvase en paralelo a cambios na concentración de CO₂ na atmosfera. Esta directa e natural relación entre a temperatura do planeta e o CO₂ atmosférico explícase pola contribución do CO₂ atmosférico, tanto o natural como o emitido polo consumo de combustíbeis fósiles, ao quencemento global por un proceso coñecido como efecto invernadero. Ao igual que a temperatura e a concentración de CO₂, o vento, outra variable meteorolóxica de gran importancia, está igualmente sometido a oscilacións de longo termo. De feito, a análise da información recollida nos diarios das viaxes transoceánicas do século XVIII amosaron cambios nos ventos de ciclicidade decadal (García *et al.*, 2000).

Todos estes cambios teñen un impacto nos distintos hábitats e ecosistemas do planeta,

entre eles, os mariños. Ademais dos efectos derivados do quencemento global, como son o incremento da estratificación superficial do océano e unha menor cantidade de osíxeno por perda de solubilidade, o medio mariño tamén se vai acidificando pola entrada de boa parte do CO₂ emitido á atmosfera. Pero son as marxes costeiras, como áreas de transición entre o continente e o océano, as máis vulnerables e expostas aos cambios físico-químicos. A pegada dos novos forzamentos derivados do cambio climático sobre os ecosistemas costeiros podería ser dramáticamente relevante por afectar ós importantes fluxos (calor, auga, nutrientes, materia orgánica...) que se dan ao longo da liña de costa. E dentro das marxes costeiras, o estudo e observación destes cambios cobran especial significado naquelas caracterizadas polo proceso de *afloramento*, localizadas principalmente nas costas occidentais de latitudes intermedias. Este proceso da dinámica oceánica describe a ascensión de augas profundas, frías e ricas en nutrientes á superficie pola acción dun vento paralelo á liña de costa en dirección ao ecuador. A entrada destas augas profundas fertiliza estas áreas costeiras nunha medida que lles permite soste-lo ~50% das pesquerías mundiais, a pesar de que as debanditas áreas só representan o 1% da extensión dos océanos. Polo tanto, o coñecemento da evolución do afloramento nun escenario de quencemento global (Solomon *et al.*, 2007) é importante tanto desde un punto de vista ecolóxico como para a explotación dos recursos costeiros (Bakun e Weeks, 2004; Barth *et al.*, 2007).

Este coñecemento é máis necesario se cabe en rexións como a costa galega, que amosa unha evolución contraria á teórica intensificación predita por Bakun (1990). Nun escenario de quencemento global (Solomon *et al.*, 2007), agardábase unha intensificación do afloramento como resposta ao crecente gradiente térmico entre o océano e o continente. Porén, análises das tendencias do vento costeiro no litoral galego apuntan a unha relaxación do afloramento nas últimas décadas (Lemos e Sansó, 2006; Álvarez *et al.*, 2008; Álvarez-Salgado *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2010). Neste traballo intentamos aclarar como as rías galegas e a súa contorna oceánica responden aos cambios observados no afloramento costeiro e as súas consecuencias tanto ecolóxicas como na explotación dos recursos.

Materiais e métodos

características da rexión de estudo

A costa galega ocupa o límite norte do sistema das Canarias, que é unha das principais rexións de afloramento do planeta. A variabilidade das condicións oceanográficas están

condicionadas principalmente pola estacionalidade do vento, que é dependente da posición e forza do anticiclón das Azores.

Ao longo desta rexión, os ventos do norte son os responsables do arrastre mar adentro da auga costeira superficial e da seguinte ascensión de auga profunda. Ventos do sul terían un efecto contrario, coñecido como *afundimento*, coa acumulación de auga oceánica de superficie sobre a liña de costa. Para a costa galega, o patrón de ventos dominante ao longo do ano establece unha estación dominada polo *afloramento* entre maio e outubro, máximo no verán, e outra dominada polo *afundimento* durante o outono e inverno (Wooster *et al.*, 1976).

Para coñecer o impacto do vento tanto nas características físico-químicas como nos ecosistemas mariños das zonas máis próximas á costa galega, realizouse un estudo na ría de Arousa. Esta ría, a máis extensa (4,8 km³) das catro rías baixas, está ben conectada coa plataforma por unha ancha e profunda boca que facilita a entrada de auga oceánica. Baixo ventos do norte, os sucesos de afloramento aceleran o sentido positivo da circulación estuarina coa chegada de auga polo fondo e a saída por superficie. Os ventos do sul relentízanse e incluso poderían invertirse (Rosón *et al.*, 1997).

A ría de Arousa é tamén o paradigma da riqueza marisqueira e pesqueira dentro das rías baixas. Entre todos os recursos destaca a extraordinaria produción de mexillón en bateas, que acada os ~250 x 10⁶ kg ano⁻¹, representando o 40% do mexillón europeo e o 15% da produción mundial (Labarta *et al.*, 2004). A produción deste molusco que acada na costa galega os maiores índices mundiais de crecemento está fortemente vencellada ás presentes condicións oceanográficas e meteorolóxicas.

Rede de monitorización da ría de Arousa

A análise do impacto da variabilidade climática realizouse a partir do estudo dos datos recollidos pola rede de monitorización do medio mariño desenvolvida polo Instituto Tecnolóxico para o Control do Medio Mariño (INTECMAR) na ría de Arousa. Esta axencia local mantén unha ampla rede de observación desde 1992, cun total de 38 estacións oceanográficas de monitorización, proporcionando datos semanais da hidrografía e sobre a comunidade do fitoplancto, especialmente en relación ao desenvolvemento de Harmful Algal Blooms (HABs). Neste traballo, utilizáronse os datos das tres estacións exteriores da ría de Arousa xa que dependen directamente das condicións oceanográficas en mar aberto e non se atopan baixo a influencia continental, principalmente da escorrentía. A temperatura e salinidade foron medidas con CTD Sea-Bird-25 en repetidos perfís verticais. A clorofila determinouse cun espectrofotómetro (Zapata *et al.*, 1994) mentras que as concentracións de nutrientes analizáronse según o método descrito por Hansen & Grasshoff (1983). Para o

estudo promediáronse os datos dos primeiros 15 metros das tres estacións.

Índice de afloramento

A intensidade tanto do *afloramento* como do *afundimento*, de signo contrario, mídese a través do chamado índice de afloramento (I_w ; $m^3 s^{-1} km^{-1}$) descrito por Bakun (1973) como:

$$I_w = -\frac{\tau_y}{\rho_{sw}f} = -\frac{\rho_{air}C_D|V|V_y}{\rho_{sw}f}$$

onde ρ_{air} é a densidade do ar ($1,22 kg m^{-3}$ a $15^\circ C$), C_D é un coeficiente empírico de arrastre adimensional, f é o parámetro de Coriolis, ρ_{sw} é a densidade da auga de mar ($1025 kg m^{-3}$) e V e V_y son, o módulo do vento e o da súa compoñente paralela á liña de costa en dirección ao ecuador. Valores positivos do índice indican afloramento mentras que valores negativos corresponden a afundimento.

Pola súa limitación á hora de representar este complexo fenómeno, I_w estimouse independentemente para dúas series temporais de ventos. Na primeira serie (SLP) considerouse un vento xeostrófico estimado polo Instituto Español de Oceanografía a partir de mapas de isobaras do Instituto Nacional de Meteoroloxía (Cabanas e Alvarez, 2005) para a posición $43^\circ N$ e $11^\circ W$. A segunda serie (NCEP) obtívose do modelo de reanálise do National Center for Environmental Prediction da National Oceanic and Atmospheric Administration dos EEUU (Kalnay *et al.*, 1996) na posición $42,853^\circ N$ e $9,37^\circ W$, correspondente a un dos seus nodos.

Os datos de teledetección de clorofila proveñen dos proxectos Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) e Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Recolléronse a través da web <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> para o período 1997 - 2007, cunha superposición de dous anos (2003-2004) entre as dúas series.

A tendencia de longa escala das distintas variables foi estimada a partir do axuste das series temporais á seguinte expresión, que extrae a compoñente estacional a partir de seis armónicos:

$$\text{Var} = a_0 + m(t/3652.5) + \sum_{i=1}^6 b_i \sin(2\pi i(t - f_i)/365.25)$$

onde t e tempo en días mentras que a_0 , b_i e f_i son parámetros do axuste.

O impacto ecolóxico do afloramento foi estimado para a plataforma exterior á Ría de Arousa e para o interior da mesma. No caso da plataforma continental calculouse a produción nova (NP), definida como a fracción da produción bruta mantida por nutrientes externos que, nas rexións de afloramento, son transportados principalmente pola agua aflorada (Eppley e Peterson, 1979). Álvarez-Salgado *et al.* (2002) desenvolveron un algoritmo para calcular esta NP en función do índice de afloramento dunha quincena dada e do seu valor durante a quincena anterior. Estimacións a partir de observacións satelitais validaron os resultados da seguinte expresión:

$$\text{NP}(\pm 197) = [(1.1 \pm 0.1) + (5 \pm 0.1) \times 10^{-4} I_w(f)] I_w(f) + (0.15 \pm 0.04) I_w(f-1).$$

A produción da materia orgánica para o interior da ría calculouse como a produción neta do ecosistema (NEP), expresada por Pérez *et al.* (2000) a partir da correlación empírica co afloramento, a estabilidade da columna de agua e o fluxo de calor superficial expresados na ecuación coas variables físicas: índice de afloramento (I_w), a frecuencia Brünt-Väisälä (BV) e irradiancia (F), respectivamente.

$$\text{NEP} = [(70 \pm 16)10^{-3} I_w(d_{0-3}) - (35 \pm 14)10^{-3} I_w(d_{4-10})] + (0.38 \pm 0.06)(F(d_{0-3}) + F(d_{4-6})) - (198 \pm 37) \text{BV}(d_{0-6}),$$

Resultados e discusión

Os resultados obtidos a partir das dúas series temporais de I_w amosaron en ambos casos un significativo e coincidente descenso do 45% na intensidade do afloramento nos últimos

40 anos (Fig. 1) cunha tasa anual de $-3,3 \pm 0,4$ e $-4,3 \pm 0,4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ y}^{-1}$ para a serie de NCEP e SLP, respectivamente. Ademais deste claro debilitamento na intensidade do afloramento, a extensión da estación de afloramento tamén mostra un evidente acurtamento duns 85 días neste período (Álvarez-Salgado *et al.*, 2008). Estos cambios, que lonxe de ser graduais están sometidos a fortes e rápidas variacións, converten a costa galega nun escenario dominado polo afundimento costeiro.

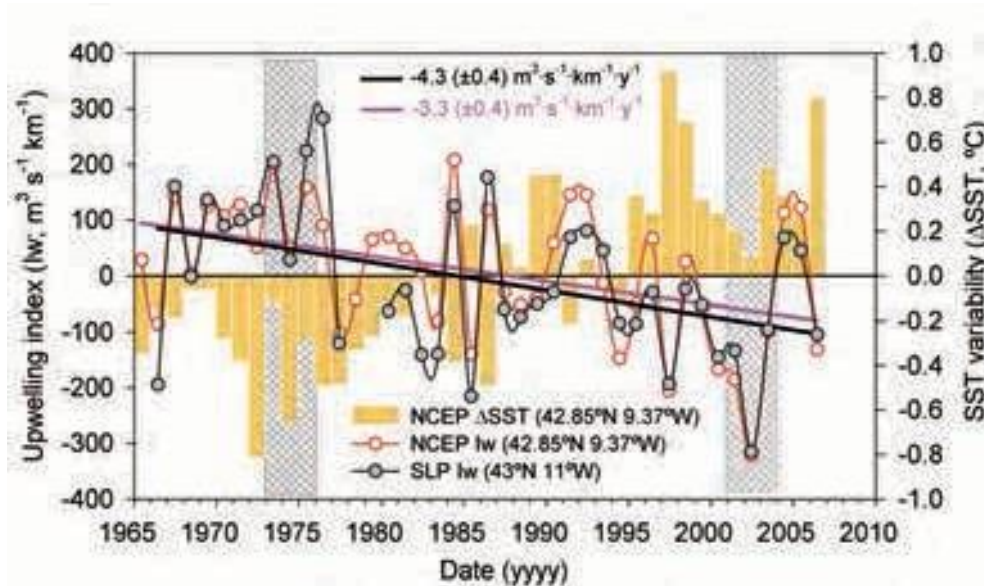


Figura 1.- Evolución anual e tendencias de longo termo de dous índices diferentes de afloramento (I_w) entre os anos 1965 e 2007: SLP I_w (línea negra e gris círculos a partir dos ventos xeostróxicos en 11°W 43°N ; punto verde na Fig. 1) e NCEP I_w (línea vermella e círculos brancos a partir de datos de NCEP en 42.85°N 9.37°W ; punto vermello na Fig. 1). As tendencias de longo termo de SLP I_w e NCEP I_w son representadas cunha liña negra e rosa, respectivamente. As barras verticais laranxas amosan a anomalía anual da temperatura superficial (NCEP SST) en relación ao valor medio do período estudado ($14,87^{\circ}\text{C}$). As áreas cinzas corresponden aos dous períodos analizados como opostos na Fig. 2 (1973-1975 e 2001-2003).

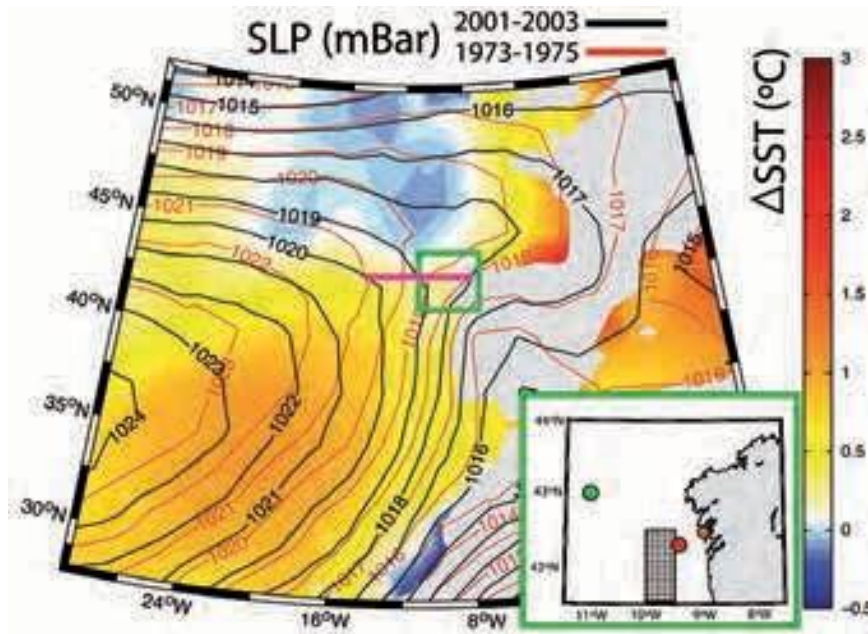


Figura 2.- O mapa de contorno de cor mostra o cambio na temperatura superficial entre os valores medios dos veráns (xuño-agosto) de 1973 - 1975 e 2001-2003 calculados a partir dos datos mensuais do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Reanalysis suministrado pola NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov/>). Superposto á temperatura, as liñas de contorno representan a presión atmosférica ao nivel do mar (hPa) para os mesmos períodos de veráns (liña vermella: 1973-1975 e liña negra: 2001-2003). A liña rosa suleña o cambio no gradiente da presión atmosférica entre os dous períodos analizados. A inserción de mapa amplifica a costa galega afectada polo afloramento costeiro onde se destacan as posicións para as que se obtiveron as series temporais do índice de afloramento amosados na figura 1: 43°N 11°W (punto verde) e 42.85°N 9.37°W (punto vermello). A concentración de clorofila da plataforma continental representada na figura 3 foi obtida da área puntillada. O punto laranxa indica a posición da boca da ría de Arousa onde se recolleron os datos do INTECMAR amosados nas figuras 4 e 5.

As razóns que poderían xustificar o descenso do afloramento na costa galega semellan atoparse nos cambios do campo de isobaras durante os meses de veráns. Esta diferenza foi ilustrada a partir da diferenza da temperatura e presión atmosférica durante dous períodos opostos en relación á intensidade do afloramento, os veráns de 1973-1975 e 2001-2003 (Fig. 2). O principal cambio

entre ambas situacións foi a relaxación dun 30% do gradiente zonal da presión atmosférica diante da costa galega. Se ben as isobaras corren paralelas ao litoral durante as situacións favorábeis ao afloramento, ábreanse coma un abano sobre o Golfo de Biscaia nos veráns dominados polo afundimento.

A relaxación dos ventos con compoñente norte na costa galega obsérvase en paralelo a un quencemento das augas, tanto na plataforma (Fig. 1) como no interior da ría de Arousa (Fig. 4), que en ambos casos é semellante; arredor de $0,27^{\circ}\text{C}$ década⁻¹. O quencemento global xunto co debilitamento do afloramento, que representa unha menor entrada de augas frías cara á superficie, principalmente durante os meses de verán, explicarían o incremento da temperatura. Ademais do aumento da temperatura, o debilitamento do afloramento facilita en boa medida o aumento da presenza de peixes mariños tropicais, xa documentada desde os anos 60 (Quéro *et al.*, 1998), fronte a diminución de especies de augas frías (Poulard e Blanchard, 2005). A presenza do afloramento nas costas galegas debuxa unha anomalía bioxeográfica en relación á distribución de peixes tropicais, sí presentes no sur de Portugal ou no interior do Cantábrico. O debilitamento desas fronteiras naturais e os cambios na estación de afloramento, moi vencellados á alimentación e desenvolvemento larvario das especies boreais, forzan o seu desprazamento ao norte. Aínda que as consecuencias deste quencemento non se pode predecir con demasiada certeza, o elevado número de especies de nova aparición (www.pescadegalicia.com) apuntan a unha tropicalización das poboacións de peixes do litoral galego. Esta tropicalización supón, por unha parte, unha maior biodiversidade pero tamén unha perda da biomasa total xa que se converte nun ecosistema menos produtivo, tal como veremos deseguido.

O debilitamento do afloramento e a conseguinte menor entrada de nutrientes á capa superficial costeira ten un importante impacto ecolóxico para a alta produtividade da costa galega. As medias anuais da concentración de clorofila recollidas por sensores satelitais, como SeaWiFS e MODIS, revelan unha diminución da comunidade fitoplanctónica de $-0,2\pm 0,08$ mg m⁻³ década⁻¹ na plataforma continental (Fig. 3). A caída da produción é reproducida cun certo desfase pola evolución das capturas de sardiña, que amosaron unha perda do 80% ao longo das últimas catro décadas. O tamaño da poboación de sardiñas do Mar Cantábrico está moi vencellado á produtividade da plataforma galega, xa que é aquí onde se alimentan durante os seus primeiros estádios antes de comezar a súa migración. Se ben o esforzo pesqueiro e as políticas de explotación foron sen dúbida críticos nos cambios observados, o freo á produción que supón o descenso no afloramento explicou o 50% das variacións interanuais das capturas de sardiña.

No interior da ría de Arousa (Fig. 4) e a diferenza do observado para a temperatura, as medidas de clorofila amosaron unha concentración cun crecemento decadal de $1,3\pm 0,4$ mg m⁻³, que foi contraria ás observacións satelitais na plataforma (Fig. 4). É ben coñecido (Bakun

e Weeks, 2004) que a propia circulación nos sistemas de afloramento acumula, ao longo da plataforma, materia orgánica sintetizada na costa. Con posterioridade, os procesos de descomposición incrementan a concentración de nutrientes no sedimento e nas capas profundas da columna de auga (Fraga, 1981), que emerxerán novamente durante os seguintes períodos de afloramento. Esta transferencia e reutilización dos nutrientes a través dos pulsos de afloramento fai do conxunto plataforma-ría un medio moi eficiente, cunha elevada produtividade e riqueza biolóxica. Ademais, soamente o 60% dos nutrientes que chegan ás rías a través de afloramento son empregados na síntese de materia orgánica, xa que o tempo de residencia non permite a súa completa utilización (Pérez *et al.*, 2000). O consumo parcial destes nutrientes aflorados fai que o debilitamento do afloramento teña un menor impacto na produción neta das rías que na plataforma. Se ben a produción neta da ría de Arousa de $618 \pm 47 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ estimada en 1966 non estaba lonxe dos $512 \pm 176 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ estimados na plataforma continental próxima, a evolución posterior de ambas rexións amosaron diminucións moi diferentes, dun 13% e 52%, respectivamente (Castro *et al.*, 2009). A considerable fertilización das rías apoiada nos procesos de acumulación de nutrientes na plataforma e o seu consumo parcial explicaría a menor caída da produtividade. Con todo, o gradual decaemento do I_w , que representa o volume de auga que chega á costa por unidade de tempo ($\text{m}^3 \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$), significa así mesmo unha dilatación do tempo de renovación nas augas interiores das rías, o que facilita unha maior eficiencia na utilización dos nutrientes. Este descenso do I_w ralentiza a renovación das rías nun 140% pasando dunha media de 8 a 19 días nos últimos 40 anos (Álvarez-Salgado *et al.*, 2008).

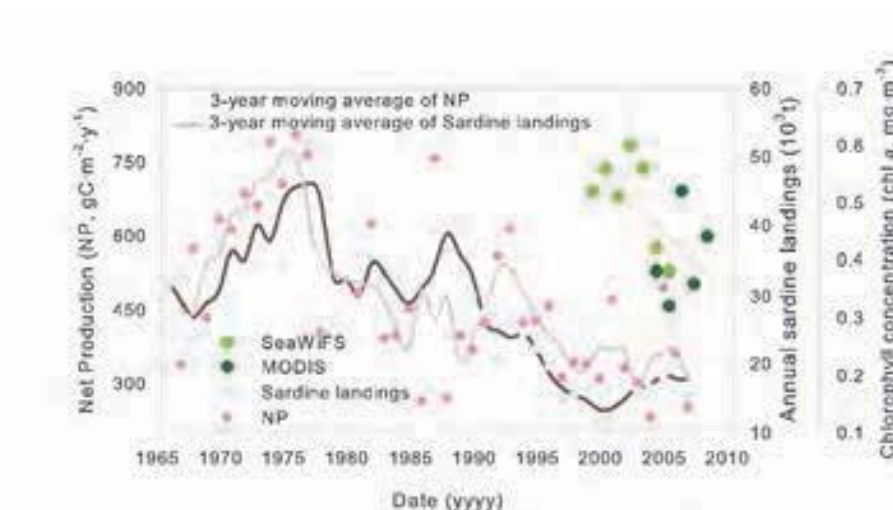


Figura 3.- Produción neta (círculos rosa) e a súa media corrida cunha ventá de 3 anos (liña gris) na plataforma continental galega. Capturas de sardiña (*Sardina pilchardus*; círculos azuis) e a súa media corrida cunha ventá de 3 anos (liña gris

oscura) para o período 1965-2006 na provincia ICES VIIIc.

O incremento do tempo de residencia, ao tempo que aumenta a eficiencia no consumo dos nutrientes aflorados, tamén xoga un papel decisivo na variabilidade das distintas sales nutritivas recollida polo INTECMAR na ría de Arousa (Fig. 5). A concentración crecente de amonio (datos non amosados), nitrito e fosfato, cunha taxa decadal de $0,11 \pm 0,03$ e $0,17 \pm 0,03$ mol L⁻¹ desde 1992 e unha tendencia interanual nula para o nitrato, indican unha intensificación da descomposición de materia orgánica fresca no medio. O aillamento das rías galegas en relación ao océano circundante favorecería tanto a formación de materia orgánica *in situ* como a súa remineralización. A menor renovación e o aumento dos nutrientes remineralizados *in situ* xustifican o aumento da clorofila no interior da ría de Arousa, en oposición ás observacións satelitais da plataforma (Fig. 4).

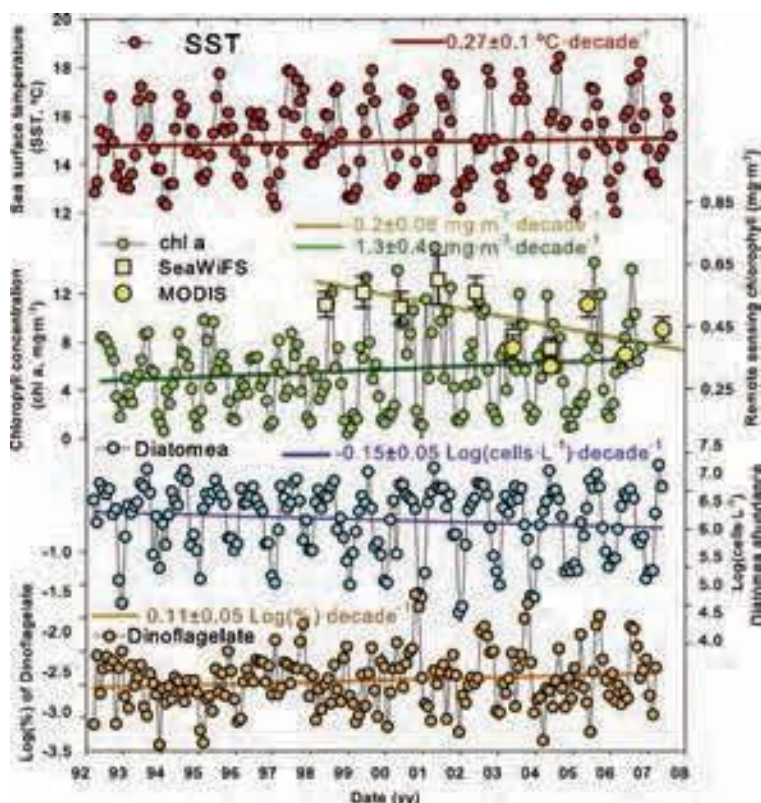


Figura 4.- Series temporais da media mensual e correspondente tendencia lineal obtidas nas estacións exteriores da Ría de Arousa entre 1992 e o 2007: (a) temperatura superficial (SST; círculos vermellos); (b) concentración de clorofila a (chl a) na ría (círculos verdes) e na plataforma continental (círculos amarelos); (c) abundancias de diatomeas (círculos azuis); (d)

logaritmo de porcentaxe de dinofl axelados en relación ao fi toplancto total (círculo laranxa).

Outro cambio significativo nas condicións oceanográficas das rías e derivado da re-lantización da renovación e do quencemento xeralizado é a maior estratificación das súas augas. Esta intensificación na estratificación, e polo tanto na estabilidade da súa columna de auga, ten un impacto na comunidade fi toplanctónica máis alá do aumento na concentración de clorofila. Neste sentido, os datos de campo da ría de Arousa mostran unha alteración ecolóxica no dominio entre os principais grupos do fi toplancto; diatomeas e dinofl axelados. As contaxes do INTECMAR mostran unha redución significativa na abundancia de diatomeas e un aumento na poboación de dinofl axelados desde 1992 (Fig 4). A sucesión fi toplanctónica entre diatomeas e dinofl axelados responde principalmente á transición do medio entre condicións turbulentas e estratificadas ao longo do ciclo estacional. Esta alternancia entre as poboacións de fi toplancto foi recollida polo distinguido ecólogo catalán Ramón Margalef (Margalef *et al.*, 1979) na teoría Mandala, que describe graficamente a relación entre o estado da columna de auga e a dinámica do fi toplancto. As diatomeas, como algas unicelulares sen sistema locomotor, atopan o balance axeitado entre a luz e nutrientes en situacións turbulentas tal como acontece no inverno, na primaveira e nos episodios de afloramento do verán. Os organismos con capacidade de movemento, como os dinofl axelados, vense favorecidos por un medio estratificado, tal como ocorre no verán e durante o afundimento, porque poden migrar na vertical entre o fondo, cunha alta concentración de nutrientes, e a superficie na procura de luz. Así, o dominio dos períodos de afundimento sobre os de afloramento no contexto climático actual favorecen a presenza e persistencia dos dinofl axelados nas rías. No caso da ría de Arousa, a súa porcentaxe incrementou dentro da comunidade fi toplanctónica cunha taxa de $0,11 \pm 0,05 \text{ Log\% década}^{-1}$ (Fig. 4).

A significativa proliferación dos dinofl axelados representa, por ser organismos produtores de biotoxinas, unha ameaza para os consumidores de peixe e marisco e un risco para a explotación destes recursos das rías galegas, en particular para o cultivo de mexillón. Cando a abundancia dos dinofl axelados nocivos convírtese en masiva desenvólvense os coñecidos HABs (Harmful Algal Bloom) ou coloquialmente, mareas vermellas. Durante estos períodos, a extracción de mexillón queda detida pola normativa sanitaria naquelas bateas afectadas para garantir a salubridade do produto. A análise do número de días que permaneceron fechados os polígonos de bateas nas rías baixas desvela a existencia dunha correlación directa co tempo de renovación da auga no interior das rías (Álvarez-Salgado *et al.*, 2008). Concretamente, o tempo de residencia para cada unha das rías, calculado como a inversa de I_w , explicou un 80% da duración dos peches por biotoxinas.

O aumento das proliferacións de algas nocivas, tal como acontece nas rías, foi documentado nos últimos anos en distintos puntos da xeografía mundial. Entre as orixes baralladas

para a multiplicación dos episodios de HABs están a crecente estratificación superficial dos océanos consecuencia do cambio climático ou ben a eutrofización derivada da maior presión antrópica sobre o litoral (Sellner *et al.*, 2003; Smayda *et al.*, 2004). Dalgunha forma, os cambios observados na comunidade fitoplanctónica da ría de Arousa concilia ambas visións. A poboación de dinoflaxelados viuse beneficiada polo descenso do afloramento costeiro no marco do cambio climático, que incrementou a estratificación así como o tempo de renovación, aumentando os procesos de remineralización da materia orgánica producida *in situ* ou chegada desde o litoral.

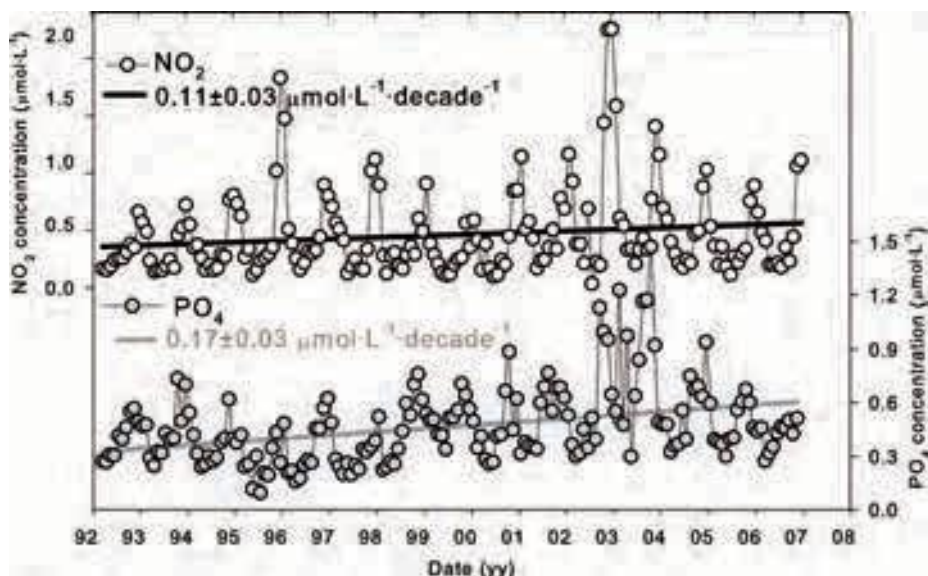


Figura 5.- Series temporais da media mensual e correspondente tendencia lineal obtidas nas estacións exteriores da Ría de Arousa entre 1992 e o 2007: (a) concentración de nitrito (NO₂; círculo branco); (b) concentración de fosfato (PO₄; círculo gris).

Os cambios observados no litoral galego revelan a sensibilidade dos ecosistemas costeiros á relaxación dos ventos do norte e ao debilitamento do afloramento. Se ben a evolución das condicións oceanográficas do medio non poden predicirse con suficiente grao de fiabilidade, as predicións dos modelos meteorolóxicos revelan un descenso na intensidade dos ventos actuais dun 25% para un horizonte do 2070-2100. De confiarmarse estes pronósticos reduciríanse os resultados observados na ría de Arousa así como as súas consecuencias, tanto ecolóxicas como socio-económicas, a saber: o confinamento das augas interiores das rías, a perda da capacidade produtiva neta, a maior recorrencia de HABs e a menor salubridade dos recursos mariños. Unha mellora da nosa capacidade predictiva xunto coa monitorización do

medio mariño sen dúbida optimizarían a xestión da explotación destes recursos así como das directrices medioambientais en relación as nosas augas costeiras.

Conclusiones

O descenso na intensidade e a menor frecuencia dos ventos de compoñente norte no observado para o período 1965 - 2007 causaron un debilitamento do 45% na intensidade do afloramento costeiro. Este relaxación relacionouse coa redución do gradiente zonal da presión atmosférica durante os veráns que amosan unha atenuación do 30% entre períodos cun máximo e mínimo afloramento. A menor chegada de nutrientes refléxase no decaemento da concentración de clorofila na plataforma continental que amosou unha taxa decadal de $-0,2 \pm 0,08 \text{ mg m}^{-3}$ e na produtividade neta que se reduciu nun 52% durante as últimas catro décadas. A perda da fertilización asociada ao debilitamento do afloramento ten un e o impacto da fertilización directamente asociada ao afloramento explicou o 50% das variacións interanuais dos desembarques de sardiña que amosaron unha perda do 80% ao longo das últimas catro décadas.

No interior das rías, o descenso na intensidade e frecuencia do afloramento xunto quenecemento superficial acrecenta o tempo de residencia da auga favorecendo a estratificación da columna de auga. Ademais a dilatación no tempo de renovación das rías incrementa os procesos de remineralización *in situ* da materia orgánica que incrementan a concentración dos fosfatos e nitritos desde 1992 cunha tendencia decadal de $0,11 \pm 0,03$ e $0,17 \pm 0,03 \text{ mol L}^{-1}$. Esta reciclaxe dos nutrientes e o aumento da eficiencia na utilización dos nutrientes que supón unha maior tempo de disponibilidad revirten a perda de clorofila observada na plataforma amosando unha clara tendencia positiva de $1,3 \pm 0,4 \text{ mg m}^{-3}$ por década na ría de Arousa. Estes cambios nas condicións oceanográficas das rías benefician o crecemento dos dinoflaxelados fronte as diatomeas, concretamente, a presenza destes grupos na comunidade fitoplanctónica teñen unhas taxas de variación decadal de $0,11 \pm 0,05 \text{ Log}(\%)$ e $-0,15 \pm 0,05 \text{ Log}(\text{cell L}^{-1})$, respectivamente. O desenvolvemento masivo cada vez máis recorrente das poboacións de dinoflaxelados, organismos xeradores de biotoxinas, teñen importantes consecuencias socio-económicas para a rexión polo risco que representan para a explotación dos recursos marisqueiros, especialmente do mexillón cuxos períodos de peche por biotoxinas explícanse nun 80% co tempo de residencia estimado a partir do índice de afloramento.

Agradecementos

O autor agradece ao comité organizador, especialmente a Jacobo Fernández Casal e ao Dr. Alejandro Guerra Díaz, pola oportunidade de presentar este traballo no Foro dos Recursos Mariños e a Acuicultura das Rías Galegas. Este estudo foi parcialmente financiado pola Comisión Europea (Proxecto CARBOOCEAN; Contrato nº 511176) e pola Xunta de Galicia (PGIDIT05PXIC40203PM, PGIDIT08MMA014402PR, PGIDIT07PXIB402153PR and PGIDIT05-MA40201PR).

Bibliografía

- Alvarez I., Gomez-Gesteira M., deCastro M., Novoa E.M. 2008. Ekman transport along the Galician Coast (NW, Spain) calculated from QuikSCAT winds. *Journal of Marine Systems* 72: 1016115.
- Álvarez-Salgado X.A., Beloso S., Joint I., Nogueira E., Chou L., Pérez F.F., Groom S., Cabanas J.M., Rees A.P., Elskens M. 2002. New production of the NW Iberian Shelf during the upwelling season over the period 1982-1999. *Deep-Sea Research*, 49: 1725-1730.
- Alvarez-Salgado X.A., Labarta E., Fernández-Reiriz X.A., Figueiras F.G., Rosón G., Piedracoba S., Filgueira R., Cabanas J.M. 2008. Renewal time and the impact of harmful algal blooms on the extensive mussel raft culture of the Iberian coastal upwelling system (SW Europe). *Harmful Algae*, 7: 849-855.
- Bakun A. 1973. Coastal upwelling indices, west coast of North America 1946-1971. *NOAA Technical Report*, NMFSSSRF-671, 103 pp.
- Bakun A. 1990. Global climate change and intensification of coastal upwelling. *Science*, 247: 1986-201.
- Bakun A., Weeks S.J. 2004. Greenhouse gas buildup, sardines, submarine eruptions and the possibility of abrupt degradation of intense marine upwelling ecosystems. *Ecology Letters*, 7: 1015-1023.
- Barnola J.M. 1987. Vostok ice corer provides 160,000-year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329: 408-414.
- Barth J.A., Menge B.A., Lubchenco J. 2007. Delayed upwelling alters nearshore coastal ocean ecosystem in the northern California current. *Proceedings of the National*

Academy of Sciences USA, 104: 371963724.

- Cabanas J.M., Alvarez I. 2005. Ekman transport patterns in the area close to the Galician coast (NW, Spain). *Journal of Atmospheric and Ocean Sciences*, 10: 3256341.
- Castro C.G., Álvarez-Salgado X.A., Gago J., Pérez F.F., Bode A., Nogueira E., Ríos A.F., Rosón G., Varela M. 2009. Evidencias bioquímicas do cambio climático en: Pérez Munuzuri, Vicente, Fernández Canamero, Marisa e Gómez Gesteira. *Evidencias e Impactos do Cambio Climático en Galicia*. Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente e Desenvolvemento Sostible.
- Eppley R.W., Peterson B.J. 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 282: 6776680.
- García R., Gimeno L., Hernández E., Prieto R., Ribera P. 2000. Reconstructing the North Atlantic atmospheric circulation in the 16th, 17th and 18th centuries from historical sources. *Climate Research*, 14: 1476151.
- Fraga F. 1981. Upwelling off the Galician Coast, Northwest-Spain. págs. 176-182 en *Coastal Upwelling*, 529 págs. Ed. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Hansen H.P., Grasshoff K. 1983. Automated chemical analysis. In: *Methods of Seawater Analysis* (eds Grasshoff K, Ehrhardt M, Kremling K), pp. 3476395. Verlag Chemie, Weinheim.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 4376470.
- Labarta U., Fernández-Reiriz M.J., Pérez-Camacho A., Pérez Corbacho E. 2004. Bateeiros, mar, mejillón. Una perspectiva bioeconómica. CIEF. Fundación Caixagalicia, Santiago de Compostela, 262 pp., ISBN 84-95491-69-9.
- Lemos R.T., Sansó B. 2006. Spatio-temporal variability of ocean temperature in the Portugal Current System. *Journal of Geophysical Research*, 111: C04010, doi:10.1029/2005JC003051.
- Margalef R., Estrada M., Blasco D. 1979. Functional morphology of organisms involved in red tides, as adapted to decaying turbulence. In: *Toxic Dinoflagellate Blooms* (eds Taylor D, Seliger H), pp. 89694. Elsevier, New York.
- Pérez F.F., Álvarez-Salgado X.A., 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: 2176236.
- Pérez F.F., Padin X.A., Pazos Y., Gilcoto M., Cabanas M., Pardo P.C., Doval M.D., Farina L. 2010. Plankton response to weakening of the Iberian coastal upwelling. *Global Change Biology*, 16: 125861267.
- Poulard J.C., Blanchard F. 2005. The impact of climate change on the fish community

- structure of the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 1436-1443.
- Quéro J.C., Du Buit M.H., Wayne J.J. 1998. Les observations de poissons tropicaux et le réchauffement des eaux dans l'Atlantique européen. *Oceanologica Acta*, 21(2): 345-351.
- Rosón G., Álvarez-Salgado X.A., Pérez F.F. 1997. A non-stationary box model to determine residual fluxes in a partially mixed estuary, Based on both thermohaline properties: application to the Ría de Arousa (NW Spain). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 44: 249-262.
- Sellner K.G., Doucette G.J., Kirkpatrick G.J. 2003. Harmful Algal blooms: causes, impacts, and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 30: 383-406.
- Smayda T.J., Borkman D., Beaugrand G., Belgrano A. 2004. Ecological effects of climate variation in the North Atlantic: phytoplankton. In: *Marine Ecosystems and Climate Variation of the North Atlantic* (eds Stenseth NC, Ottersen G, Hurrell JW, Belgrano A, Planque B), pp. 49-58. Oxford University Press, Oxford.
- Solomon S., Qin D., Manning M. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, *Fourth IPCC Report*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K.
- Wooster W.S., Bakun A., McLain D.R. 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *Journal of Marine Research*, 34: 131-140.
- Zapata M., Maneiro J., Muñiz S., Blanco J., Mariño J. 1994. Determinación espectrofotométrica de clorofila a, b y c para el control rutinario de poblaciones fitoplanctónicas en aguas costeras. In: *Tercera Reunión Ibérica sobre fitoplancton tóxico y biotoxinas* (eds Mariño J., Maneiro J.), p. 47, Xunta de Galicia, Santiago Compostela.