

Resumen ejecutivo

Antonio Bode, Alicia Lavín y Luís Valdés

La región atlántica del norte de España es una región de elevados contrastes oceanográficos. Por un lado incluye el límite septentrional de la región de afloramiento que abarca desde las Islas Canarias y norte de África hasta el norte de Galicia y oeste del mar Cantábrico. El afloramiento está influido estacionalmente por los vientos y es el responsable de la elevada fertilidad de las aguas costeras y, a la vez, de su baja temperatura. Por otro lado, incluye la parte meridional del Golfo de Vizcaya, con características de un mar semicerrado en el que se da un gradiente marcado desde las aguas frías del afloramiento en Galicia a las más cálidas de las costas cántabras y vascas. Además existe todo un sistema de corrientes ligado a la dinámica del Atlántico nororiental que influye en el transporte de calor, nutrientes y organismos a lo largo de toda la región. Un ejemplo destacado es la corriente que discurre en dirección al Polo Norte a lo largo del talud continental y que acerca a estas costas aguas y especies de origen subtropical. Todas estas características oceanográficas hacen que en esta región se encuentren abundantes ejemplos de límites biogeográficos, con mezcla y separación de especies y ecosistemas típicamente boreales o meridionales. Además, entre 500 y 1500 m de profundidad aproximadamente una corriente de aguas cálidas y salinas que han incorporado la descarga de aguas del Mediterráneo al Atlántico recorre el talud continental ibérico desde su origen en el Golfo de Cádiz. Esta región constituye, por tanto, un laboratorio a pequeña escala espacial donde comprobar los efectos inducidos por el cambio climático que afecta al océano mundial aunque con efectos y consecuencias que difieren regionalmente.

Los primeros efectos del clima se manifiestan sobre las propiedades de las masas de agua y sobre los elementos básicos de las redes tróficas marinas (el plancton), para luego transmitirse a todos los componentes del ecosistema oceánico. Estos efectos pueden confundirse en la zona costera con otros causados directamente por la acción del hombre, como la contaminación. La observación del océano abierto está limitada a observaciones *in situ* muy detalladas, pero en unas pocas estaciones representativas, o a la observación remota y extensiva, usando satélites artificiales, de unas pocas variables medidas en los primeros milímetros de la lámina de agua más superficial. A pesar de lo limitado de las observaciones, el ecosistema pelágico en aguas abiertas de la plataforma continental resulta relativamente accesible y en ella realizamos observaciones sistemáticas y continuadas desde hace más de 20 años. A continuación se resumen los principales efectos observados en el ecosistema pelágico de la región noratlántica española a medio y largo plazo, basados principalmente en las observaciones realizadas por el Instituto Español de Oceanografía (IEO) en sus programas de observación del océano desde la década de 1990, pero también otras observaciones como el nivel del mar que se iniciaron en la década de 1940. Los efectos se clasifican, de acuerdo al grado de conocimiento actual, como de alta, media o baja certidumbre. Esta clasificación depende principalmente de la longitud de la serie de datos disponibles que, en la mayor parte de los casos, es aún corta para revelar los mecanismos de actuación de las perturbaciones ambientales a escalas decadales como requieren los estudios del clima.

Clima y meteorología

Las variaciones en las condiciones atmosféricas condicionan las propiedades de la capa superficial del océano y éstas a su vez las de las capas más profundas. También el océano influye en la atmósfera a través del intercambio de calor y gases. La interacción atmósfera-océano se produce a todas las escalas temporales pero es la variabilidad decadal la que consideramos cuando estudiamos los efectos del clima. Los principales efectos de la atmósfera sobre la dinámica del océano se deben a las variaciones de presión que causan los vientos responsables de fenómenos como el afloramiento. Estas variaciones de presión se identifican a escala regional mediante índices climáticos como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), que mide la diferencia de presiones sobre el Atlántico en el norte de Europa con respecto a las del sur.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> Se produce un calentamiento en toda la región. 	<ul style="list-style-type: none"> El calentamiento no es uniforme por la presencia de inviernos anormalmente fríos (ej. 1991, 1922, 2006 y 2009) 	
Precipitación		<ul style="list-style-type: none"> No se encuentra una tendencia general definida en la precipitación costera, pero en las últimas décadas predominan anomalías negativas especialmente en los límites de la región (sur de Galicia y Cantábrico oriental) 	<ul style="list-style-type: none"> Existe una tendencia a una menor cantidad de precipitaciones en verano.
Vientos (afloramiento)		<ul style="list-style-type: none"> Existen ciclos decadales en la intensidad y frecuencia de los vientos favorables al afloramiento (disminución hasta finales de la década de 1990) 	<ul style="list-style-type: none"> Los efectos son más acusados en Galicia (zona de transición) que en el sur de Portugal o en el mar Cantábrico oriental.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Efectos climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • La influencia de la NAO en el clima de la región está modificada por otros patrones de variabilidad de la atmosfera, como el índice del Atlántico Oriental en Galicia y el índice de Escandinavia en el Cantábrico. • La influencia de los distintos patrones climáticos sobre la temperatura, precipitación y vientos varía estacionalmente. 	<ul style="list-style-type: none"> • La NAO tiene menos influencia en la región en las últimas décadas. • Los mayores efectos del clima sobre la precipitación y temperatura se dan en invierno y verano, mientras que el afloramiento depende principalmente de las condiciones de la atmósfera en invierno, primavera y otoño. 	

Hidrografía

Las principales propiedades de las masas de agua que primero responden a la influencia climática y atmosférica en el flujo de calor son la temperatura y salinidad, que determinan a su vez la capacidad de estratificación por densidad de las aguas. También es de interés determinar la profundidad de la capa de mezcla, ya que de ella depende el aporte de nutrientes a la zona superficial iluminada donde ocurre la producción primaria, y las corrientes que transportan agua y organismos.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Se produce un calentamiento de toda la columna de agua desde la superficie a las capas de agua más profundas (>0.2 °C por década) ligado al de la atmósfera. 	<ul style="list-style-type: none"> • No se aprecian tendencias en los ciclos estacionales de temperatura. 	

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
	<ul style="list-style-type: none"> • Existen mayores oscilaciones de temperatura en el Cantábrico que en Galicia (debido a la distinta influencia del afloramiento y del continente). • En las aguas costeras la tendencia al calentamiento se enmascara por la elevada variabilidad de corta escala. • Se producen anomalías térmicas marcadas, como el frío invierno de 2005 o el cálido verano de 2003. 		
Salinidad		<ul style="list-style-type: none"> • La salinidad superficial está más influenciada por fluctuaciones interanuales. 	
Estratificación	<ul style="list-style-type: none"> • No existe una tendencia uniforme hacia el incremento de estratificación en la región. Las probabilidades de estratificación estival en la plataforma es mayor en el Cantábrico que en Galicia debido a la distinta influencia del afloramiento. • A partir de 2005, el límite permanente de densidad de las Aguas Centrales del Atlántico (picnoclina) se hace más cálido y salino. 	<ul style="list-style-type: none"> • La profundidad de la capa de mezcla y la estratificación de la capa más superficial presentan una elevada variabilidad entre años. • La elevada mezcla invernal de las aguas en 2005 y 2009 sugiere un cambio de régimen oceánico. 	

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Corrientes			<ul style="list-style-type: none"> Debido a su elevada variabilidad no se han podido determinar tendencias definidas en las corrientes.

Nivel del mar

Determinar y predecir la variabilidad del nivel del mar es imprescindible para conocer el comportamiento de la línea de costa y planificar su uso. Las series de observaciones disponibles en la región se remontan a 1943, por lo que permiten un análisis detallado de su evolución reciente.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Nivel del mar	<ul style="list-style-type: none"> El aumento del nivel del mar observado en los últimos 67 años (2.38, 2.45 y 2.65 mm por año en Santander, A Coruña y Vigo).es mayor del observado a nivel global en el mismo periodo (1.8 ± 0.5 mm por año). 		<ul style="list-style-type: none"> Las estimaciones de niveles extremos a 120 años se incrementarán entre +0.10 y +0.25 m con respecto a los niveles registrados.
Efectos climáticos	<ul style="list-style-type: none"> El patrón general de la variabilidad espacial del nivel medio del mar responde al clima regional, representado por la NAO. 	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo de las tendencias en periodos de 30 años presenta un mínimo entre 1964-1993, atribuido a un aumento de la presión atmosférica media en invierno en el sur de Europa. 	

Nutrientes

Las sales nutrientes (principalmente de nitrógeno, fósforo y sílice) son imprescindibles para la producción primaria marina. Su aporte desde las aguas profundas a la superficie determina la productividad y riqueza de recursos biológicos marinos y está íntimamente ligado a los patrones hidrográficos regionales y locales. Sin embargo, el efecto fertilizador no sólo depende de su concentración en las aguas sino también de las proporciones relativas entre los distintos elementos.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Concentraciones	<ul style="list-style-type: none"> Las variaciones estacionales son más predecibles en el Cantábrico que en Galicia debido al afloramiento. Los promedios climáticos de las concentraciones son más elevados en el sur que en el norte de Galicia, y mayores en Galicia que en Cantábrico. Las anomalías en la concentración de nutrientes se propagan rápidamente a todos los niveles de la columna de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento interanual (especialmente de nitrato y fosfato) en toda la región, pero con diferencias locales. 	<ul style="list-style-type: none"> Parecen existir ciclos decadales de variación que dificultan la interpretación de las tendencias.
Fertilización	<ul style="list-style-type: none"> El nitrógeno es el principal nutriente limitante de la producción primaria en la región. 	<ul style="list-style-type: none"> El silicato, y a veces el fosfato, puede ser limitante de la producción primaria, especialmente en el mar Cantábrico. 	<ul style="list-style-type: none"> No parecen existir tendencias definidas en la limitación por nutrientes a escala regional.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Efectos climáticos		<ul style="list-style-type: none"> En Galicia (pero no en el Cantábrico) hay un efecto significativo de índices climáticos regionales como la NAO (que favorece el incremento de nitrato y fosfato por el afloramiento) y la componente del Atlántico Oriental (que los disminuye). 	<ul style="list-style-type: none"> Los efectos locales de alta frecuencia (ej. vientos) parecen tener mayor importancia que los climáticos en la fertilización de las aguas superficiales y en la producción primaria resultante.

Picoplancton

Entre los organismos más pequeños del plancton están microalgas y bacterias fotosintéticas (organismos autótrofos) pero también bacterias descomponedoras de la materia orgánica (organismos heterótrofos). Su observación sistemática en la región atlántica española es reciente, pero el análisis de las series disponibles permite extraer indicios de cómo será el ecosistema pelágico en las próximas décadas.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Autótrofos	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo de variación estacional domina sobre tendencias o ciclos multianuales. 	<ul style="list-style-type: none"> No existen aún tendencias definidas de cambio en la abundancia y biomasa de picoplancton autótrofo. 	<ul style="list-style-type: none"> La elevada influencia de eventos de alta frecuencia sobre el picoplancton limita la capacidad predictiva sobre tendencias a largo plazo de las series disponibles.
Heterótrofos	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo de variación estacional, ligado al ciclo de la producción primaria, domina sobre tendencias o ciclos multianuales. 	<ul style="list-style-type: none"> Parece existir un aumento anual de bacterias en Galicia (A Coruña) y una disminución en el Cantábrico (Gijón). 	

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Efectos climáticos		<ul style="list-style-type: none"> El aumento de temperatura parece favorecer una mayor biomasa relativa de células pequeñas en el plancton. 	

Fitoplancton

El fitoplancton lo componen, además de bacterias fotosintéticas, microalgas de diversos grupos que constituyen los principales productores primarios del océano. Cada grupo de microalgas está mejor adaptado que los demás a un determinado ambiente oceánico, por lo que el estudio de sus proporciones relativas constituye un indicador del cambio en la base de la red trófica marina. Las diatomeas son especies típicamente asociadas a los momentos de mayor productividad y condiciones de mezcla de aguas, como las observadas durante el afloramiento. En contraste, los dinoflagelados están asociados a condiciones de mayor estratificación y, generalmente, aguas más cálidas.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Fitoplancton	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo estacional domina sobre la variabilidad a escala multianual en toda la región. 	<ul style="list-style-type: none"> Parece existir una cierta tendencia interanual al aumento de dinoflagelados y a la disminución de diatomeas, aunque sin una relación clara con el calentamiento en toda la región. 	<ul style="list-style-type: none"> La elevada influencia de eventos de alta frecuencia sobre el fitoplancton (como el afloramiento) limita la capacidad predictiva sobre tendencias a largo plazo de las series disponibles.
Efectos climáticos		<ul style="list-style-type: none"> No se encuentran efectos directos de índices climáticos sobre el fitoplancton de la región. 	<ul style="list-style-type: none"> El incremento de dinoflagelados en el Cantábrico (Cudillero) se asocia con el calentamiento.

Biomasa y producción primaria

La biomasa y producción del fitoplancton son la base que sustenta la red trófica pelágica. Su variabilidad en la región se ha analizado teniendo en cuenta tanto las series de observación del IEO como otras series que permiten comprender la variabilidad a mayor escala, como las observaciones realizadas por los satélites o por barcos de oportunidad.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> No han existido cambios importantes en la biomasa media anual desde 1958 en el océano próximo y desde 1990 en las aguas costeras. El ciclo estacional domina sobre la variabilidad a escala multianual en toda la región. 		
Producción primaria	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo estacional domina sobre la variabilidad a escala multianual en toda la región. 	<ul style="list-style-type: none"> Los valores medios de producción primaria aumentan en Galicia (A Coruña) pero disminuyen en el Cantábrico (Cudillero). 	
Efectos climáticos	<ul style="list-style-type: none"> Las aguas frías están asociadas a valores elevados de biomasa y producción primaria, como corresponde a una zona de afloramiento. 	<ul style="list-style-type: none"> Parece existir una cierta relación entre la producción primaria y las proporciones entre los nutrientes. 	<ul style="list-style-type: none"> A diferencia de lo que ocurre en el océano profundo, no se ha encontrado un efecto directo e inmediato de factores climáticos sobre la biomasa y la producción primaria de la región.

Zooplankton

El zooplankton incluye a los primeros consumidores del fitoplancton y los principales intermediarios de la transferencia de la materia orgánica a los peces y otros recursos marinos explotados. También es el responsable de gran parte del transporte del CO₂ fijado en la materia orgánica a los sedimentos. Su composición de especies, al igual que la del fitoplancton, refleja la variedad de condiciones ambientales de las aguas y es uno de los componentes del ecosistema que primero responde a las alteraciones del clima. Uno de los grupos de los que se dispone de mayor información es el de los copépodos, ya que suelen dominar en número y biomasa sobre otros grupos de zooplankton. También es de interés analizar la abundancia de organismos gelatinosos, entre los que destacan las medusas (organismos predadores) y los tunicados (consumidores de fitoplancton), que pueden encontrarse puntualmente en grandes cantidades.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Biomasa	<ul style="list-style-type: none"> El ciclo estacional domina sobre la variabilidad a escala multianual en toda la región. 	<ul style="list-style-type: none"> Se producen incrementos en Galicia (Vigo y A Coruña) pero no en el Cantábrico (Cudillero, Gijón y Santander). 	
Especies	<ul style="list-style-type: none"> Aumentan las especies de copépodos típicas de aguas cálidas, especialmente en el Cantábrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Algunas especies de copépodos aumentan en el sur de Galicia (Vigo) y otras disminuyen en el norte (A Coruña) y en el Cantábrico (Santander). Se ha detectado un aumento del plancton gelatinoso en Galicia, (medusas en Vigo y tunicados en A Coruña). En el océano próximo se han registrado incrementos en los copépodos entre 1960 y 1986, pero no después. 	<ul style="list-style-type: none"> Los cambios en las proporciones entre plancton gelatinoso y copépodos sugieren que la red trófica pelágica se está haciendo menos eficiente en la transferencia de materia orgánica hacia los peces.

	Alta certidumbre	Media certidumbre	Baja certidumbre
Efectos climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • El efecto de los factores climáticos sobre el zooplancton se traduce en cambios locales en factores como la temperatura y la estratificación superficial. 	<ul style="list-style-type: none"> • El afloramiento favorece el incremento de biomasa y número de especies en la costa y la disminución de la diversidad y número de especies en el océano próximo. • El calentamiento favorece el incremento generalizado de biomasa y especies en Galicia, mientras que en el Cantábrico se asocia con el incremento de especies de aguas cálidas y disminución de las adaptadas a aguas más frías. 	<ul style="list-style-type: none"> • La alta variabilidad ambiental, causada en gran parte por el afloramiento, hace que los posibles efectos climáticos sobre el zooplancton sean absorbidos a escalas anuales y locales. • No se puede descartar la existencia de efectos retardados en el tiempo.

Conclusión

Debido a la variedad de influencias oceanográficas que presenta la región atlántica del norte de España, su respuesta a los cambios inducidos por el clima presenta particularidades y diferencias con respecto a los observados en regiones próximas del Atlántico. En esta región el aumento del nivel del mar y el calentamiento de las aguas han ocurrido a una velocidad sensiblemente superior a la media global, especialmente en las últimas décadas. Además, la influencia del afloramiento, que fertiliza estacionalmente las aguas costeras, ha experimentado cambios recientes en correspondencia con la variabilidad en el clima, cambios que han afectado al aporte de nutrientes y a la biomasa, producción y composición del plancton. A pesar de que la longitud de las series de registros es aún corta para determinar las causas y mecanismos por los que el clima afecta al ecosistema pelágico de la región, es posible avanzar que en las próximas décadas la biomasa y composición del plancton será diferente de la actual, especialmente en el mar Cantábrico, donde la influencia del afloramiento es más reducida y el calentamiento se manifiesta con mayor claridad. Según las tendencias encontradas, en el futuro el plancton de la región estará compuesto por un mayor número de especies típicas de aguas cálidas, con un tamaño corporal menor que las actuales y que, probablemente, alcanzarán menores valores de biomasa. Estos cambios serán menos probables en Galicia, donde será crítico determinar la influencia del afloramiento a escalas multidecadales.