

Un mar de números: estadística y análisis de datos en el Instituto Español de Oceanografía

Antonio Bode, Isabel González Herraiz,
Dolores Garabana, Paz Sampedro y A. Celso Fariña
Instituto Español de Oceanografía, Centro Oceanográfico de A Coruña

La cuantificación de los procesos oceanográficos y los recursos marinos ha sido una necesidad constante en el Instituto Español de Oceanografía (IEO) desde su creación en 1914¹. La investigación marina actual no sería posible sin el análisis estadístico de una gran cantidad de información numérica.

Además de contribuir a mejorar nuestro conocimiento sobre el funcionamiento del océano, el IEO asesora a la Administración Española y a distintos organismos nacionales e internacionales sobre el estado del océano y la sostenibilidad de sus ecosistemas. Pero interpretar los cambios que ocurren en un medio tan dinámico como el marino requiere de una gran capacidad de análisis de procesos ambientales y biológicos con una representación numérica. La aplicación de este conocimiento a la gestión del mar, actualmente extendido desde la regulación de las pesquerías a la gobernanza del océano en su conjunto, tiene un soporte estadístico.

Actualmente, se construyen modelos cada vez más sofisticados para representar los procesos fundamentales, desde el calentamiento y las corrientes marinas, al funcionamiento biogeoquímico o la dinámica de las poblaciones de peces. Modelos que se ajustan y diseñan teniendo en cuenta el conocimiento estadístico acumulado de las observaciones *in situ*, sin el cual no serían cada vez más realistas. De esta forma, modelos y observaciones interaccionan para mejorar nuestro conocimiento del océano y predecir su comportamiento futuro. Seguidamente, hacemos un breve resumen de dos de los muchos tipos de aplicaciones de la estadística a problemas de investigación

oceanográfica actual: el estudio de los efectos del cambio global y la gestión de pesquerías.

EL CAMBIO GLOBAL TAMBIÉN OCURRE EN NUESTROS MARES

El calentamiento del mar tal vez sea uno de los efectos más popularizados de los cambios climáticos recientes, especialmente en relación al incremento de CO₂ en la atmósfera después de la Revolución Industrial². Este calentamiento tiene importantes consecuencias en el funcionamiento del océano. Por un lado, favorece la estratificación y dificulta el intercambio de nutrientes entre las aguas profundas y la zona iluminada donde se produce la mayor parte de la biomasa marina. Por otro, modifica las corrientes marinas, dependientes de los gradientes de temperatura y densidad, e incrementa el nivel del mar. Sin embargo, además de la temperatura se incrementa la acidez por la captación de CO₂ atmosférico. A su vez, las especies marinas deben adaptarse a las transformaciones de su hábitat mediante cambios fisiológicos o migraciones, con lo que alteran la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. El océano es un regulador clave del clima y de los ciclos biogeoquímicos que ha registrado cambios importantes en los últimos decenios y cuyas consecuencias no son aún totalmente predecibles. Muchos de los cam-

¹ El Instituto Español de Oceanografía, creado por Real Decreto de 17 de abril de 1914, es un organismo público de investigación (OPI) dedicado a la investigación en ciencias del mar, especialmente en lo relacionado con el conocimiento científico de los océanos, la sostenibilidad de los recursos pesqueros y el medio ambiente marino. El IEO depende del Ministerio de Economía y Competitividad, a través de la Secretaría de Estado de Investigación (<http://www.ieo.es>).

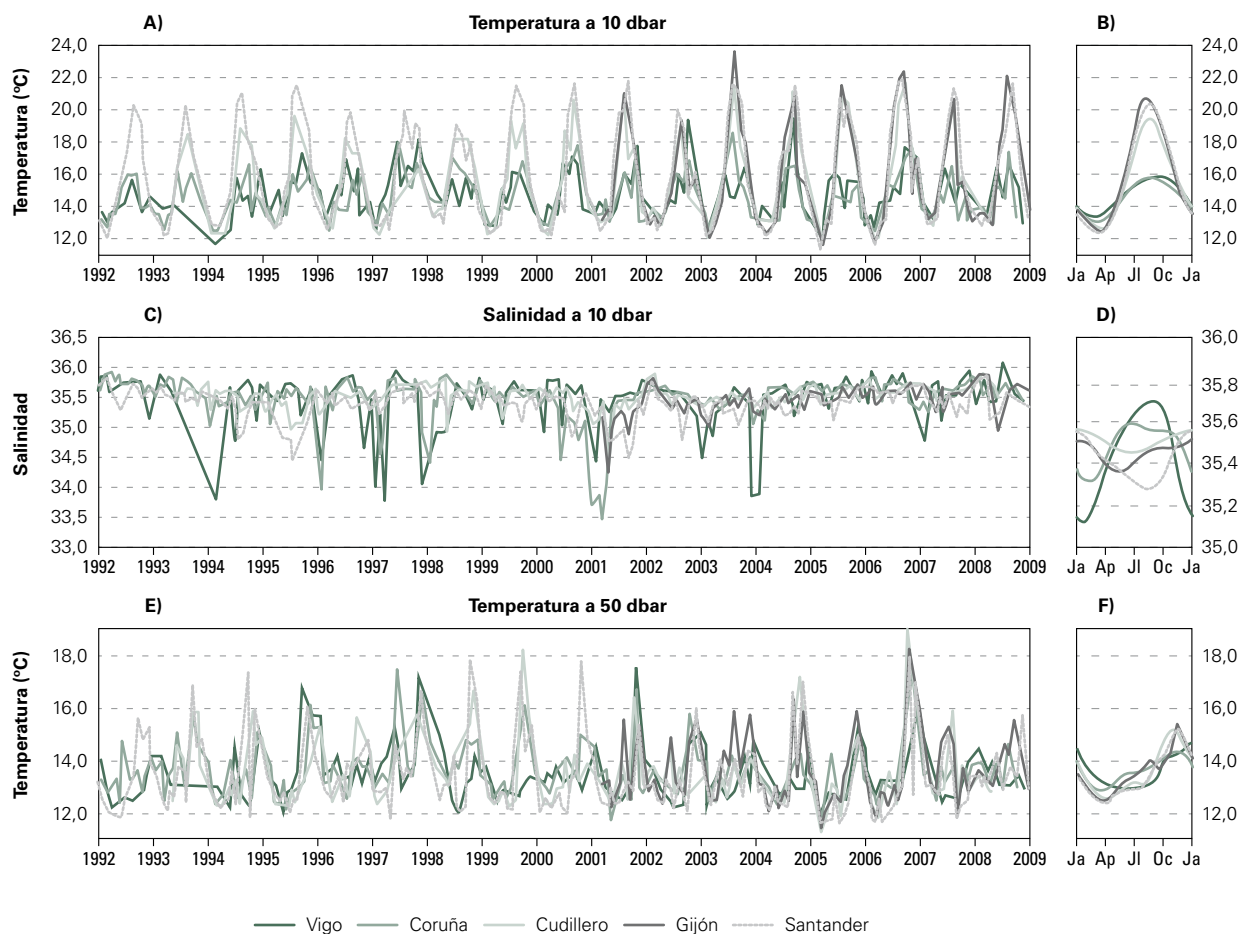
² Ocean Systems. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>

bios acaban afectando a todas las regiones del océano, al estar conectado por un sistema global de corrientes. No obstante, las particularidades de los procesos a escalas locales y regionales afectan a la intensidad de estos cambios y a su retraso o adelanto relativo entre zonas. Además, algunas especies marinas están muy adaptadas a determinados ambientes y resultan más afectadas que otras más generalistas.

Las series de observaciones oceanográficas reunidas por el IEO nos han permitido valorar los impactos de los cambios climáticos y oceanográficos recientes en los mares que rodean la Península Ibérica. Así, el análisis estadístico de las observaciones en el Mar Mediterráneo ha determinado un rápido ascenso de las temperaturas medias

de hasta 0,08°C por década desde 1970. Este calentamiento, aunque más atenuado, también se detectó en las capas de agua profundas, y aunque pueda parecer pequeño, supone una elevada transferencia de energía en forma de calor entre la atmósfera y el mar, debido al elevado calor específico del agua marina. En contraste, la temperatura del aire se incrementó 0,15°C por década, lo que ilustra el efecto regulador del mar. También se detectó un aumento significativo de la salinidad, debido al efecto conjunto de la disminución de las precipitaciones en el Mediterráneo y la disminución del aporte de los ríos, debido a la construcción de embalses en su cuenca hidrográfica. Estos estudios, basados en el análisis estadístico de las observaciones disponibles, revelan que el Medite-

Figura 1. Ejemplos de series de observaciones de temperatura y salinidad de varias estaciones de Galicia y del mar Cantábrico. En los paneles de la derecha se refleja el patrón de variación estacional dominante (modificado de Bode y cols., 2012).



Fuente: modificado de Bode y cols., 2012.

rráneo constituye un laboratorio natural para el estudio de los efectos de los cambios climáticos, que reproduce a una escala accesible la mayor parte de los procesos dominantes en el océano global.

Los cambios en el océano global se observan especialmente matizados en las costas de Galicia y del mar Cantábrico. En primer lugar, el aumento del nivel del mar observado entre 1943 y 2010 (p. ej. 2,7 mm al año en Vigo) es superior al promedio global medido en el mismo período (1,8 mm al año). En segundo lugar, el calentamiento, que aunque es reconocible desde la superficie a las capas de agua más profundas (superando incluso 0,2°C por década desde 1990), es más evidente en el Cantábrico que en Galicia, debido a la mayor influencia del afloramiento de aguas profundas (y frías) en esta última región (Figura 1). Este calentamiento diferencial hace que las aguas del Cantábrico tengan una mayor probabilidad de estratificación en verano, y, por tanto, una mayor reducción de los aportes de nutrientes desde las aguas profundas. Sin embargo, las observaciones no detectan un empobrecimiento significativo de nutrientes a largo plazo debido a la dominancia de la variabilidad a corto plazo (p. ej. estacional) y a la relativa estabilidad del afloramiento en las últimas dos décadas. También hay que tener en cuenta la influencia de los vertidos de origen antropogénico, que incrementan las concentraciones de nutrientes en las aguas costeras de forma independiente a las variaciones climáticas.

Los efectos sobre las especies marinas de estas alteraciones resultan difíciles de separar de otros, como los causados por la pesca, introducción ac-

cidental o intencionada de especies o la contaminación. Por ejemplo, se han utilizado modelos de regresión (ARIMA) con distintos retardos para estimar la importancia relativa de variables ambientales, económicas y biológicas en la variación de la abundancia de distintos stocks pesqueros durante varias décadas. En el caso del plancton, un buen indicador de los cambios ambientales ya que los organismos que lo componen viven desde unas pocas horas a varios meses y responden rápidamente a las alteraciones en el clima y en las condiciones oceanográficas, los análisis de las series indican que el calentamiento favorecerá una mayor dominancia de las especies de pequeño tamaño y de aquellas adaptadas a aguas cálidas.

La mejora en nuestra capacidad de predicción de las condiciones y composición del océano futuro requieren la implementación y desarrollo de nuevas técnicas de observación y modelización del océano, pero también especialmente del mantenimiento de las series de observaciones multidisciplinares *in situ*³. Sin estas series no se podrían construir ni validar los modelos numéricos cada vez más complejos que abarcan desde las variaciones meteorológicas a la producción de recursos marinos, y que nos servirán para anticipar y adaptar nuestro uso del océano a un clima más cálido y una creciente demanda de recursos y servicios marinos previsible por las estadísticas de los últimos decenios.

LA RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS PESQUEROS PARA UNA GESTIÓN SOSTENIBLE

La investigación en el Área de Pesquerías del IEO⁴ está dirigida a examinar el estado de las poblaciones de las especies marinas explotadas y proponer con base científica las medidas de gestión pesquera que aseguren a largo plazo el rendimiento máximo sostenible desde el punto de vista económico, ambiental y social. Se trata de un trabajo multidisciplinar en el que colaboran investigadores del IEO y de otros países en el marco de organizaciones internacionales como ICES⁵ y NAFO⁶ que asesoran científicamente a la Unión Europea.

³ Como ejemplos: el proyecto RADIALES (<http://www.seriestemporales-ieo.com/>) mantenido por el IEO desde 1990 o el Observatorio RAIÁ (<http://www.observatorioraia.org/>) que integra observaciones oceanográficas realizadas por diversos organismos de Galicia y Norte de Portugal.

⁴ Área de Pesquerías del IEO (<http://www.ieo.es/web/ieo/area-pesquerias>)

⁵ ICES: Consejo Internacional para la Exploración del Mar (<http://www.ices.dk>)

⁶ NAFO: Organización de Pesquerías del Atlántico Norte (<http://www.nafo.int/>)



La difícil accesibilidad a los recursos pesqueros impide cuantificarlos directamente, y para ello se realizan diversas estimaciones. En primer lugar, se estima la abundancia del recurso (número de individuos de la misma especie en una población) por medio de prospecciones pesqueras con buques oceanográficos. En el caso de las especies pelágicas costeras (sardina, caballa), generalmente distribuidas en amplias áreas geográficas, se realizan prospecciones acústicas. Se obtienen así ecogramas que, combinados con pescas y muestreos, proporcionan información sobre las especies que componen los cardúmenes, su estado de madurez, estructura de edades, relaciones tróficas y abundancia relativa. En el caso de las especies asociadas al fondo (demersales y bentónicas, p.ej. merluza y rape) la estimación directa de la abundancia se realiza mediante prospecciones por arrastre de fondo, en las que la captura media por unidad de esfuerzo (o unidad de área) se asume proporcional a la abundancia en un área determinada. Por otra parte, con los datos de desembarcos y esfuerzo de pesca de las distintas flotas que actúan sobre un recurso pesquero, obtenidos sistemáticamente a lo largo de los años, se pueden obtener también estimaciones de las tendencias temporales de la abundancia de dicho recurso.

Una vez conocida la abundancia, es necesario determinar ciertos aspectos biológicos para caracterizar la población y su estructura demográfica. Esto se realiza mediante el análisis y procesado de muestras biológicas. Así, en primer lugar, se

La investigación en el Área de Pesquerías del IEO está dirigida a examinar el estado de las poblaciones de las especies marinas explotadas y proponer las medidas de gestión pesquera que aseguren a largo plazo el rendimiento máximo sostenible desde el punto de vista económico, ambiental y social

estima la edad individual mediante el análisis e interpretación de marcas alternas regulares que el paso de las estaciones anuales imprime en determinadas piezas de su cuerpo (escamas, otolitos, vértebras). En algunas especies (p. ej. sardina, caballa, anchoa) estas marcas son bien visibles en los otolitos, estructuras calcáreas del oído interno que crecen a lo largo de la vida del individuo mediante el depósito de capas en forma de anillos (Figura 2). Con los datos de edad y tamaño de los individuos se determina el crecimiento. Por otra parte, mediante la observación microscópica y el análisis de las gónadas se determina la edad a la que comienza a reproducirse la población (edad de maduración) y la fecundidad o número de huevos que producen las hembras.

Figura 2. Los anillos que se forman en los otolitos (estructura calcárea del pez) permiten determinar la edad del individuo. Izqda.: extracción del otolito. Dcha.: a mayor número de anillos, más edad y mayor tamaño.

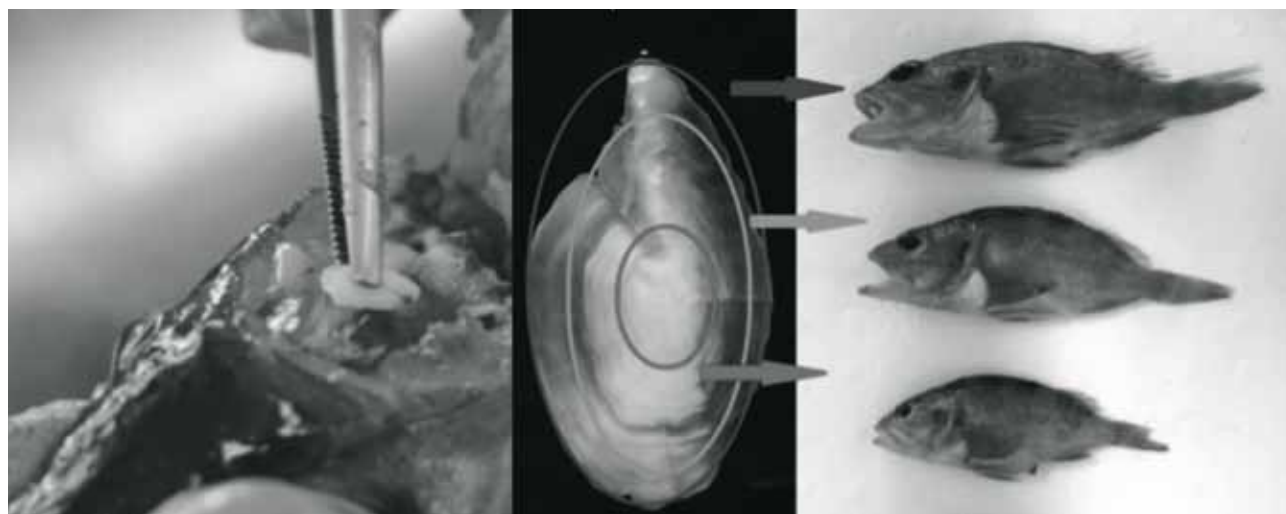


Foto: Maria Sainza Sousa. IEO

En la evaluación del estado de explotación de un recurso participan científicos de varios países en grupos de trabajo que se rigen bajo las directrices de las correspondientes organizaciones regionales de pesca

Una vez conocidos la abundancia, el crecimiento y las variables reproductivas, se estima la producción de la población. Pero para conocer la biomasa real, hay que tener en cuenta la reducción debida a la mortalidad natural y a la causada por la pesca. La mortalidad pesquera se estima a partir de la cuantificación de la captura (individuos que se extraen de la población mediante la pesca). La captura está compuesta por lo que se desembarca en puerto para su comercialización y por el descartado (parte que se devuelve al mar por su bajo valor comercial, ser inferior a la talla mínima legal u otras razones). Los desembarcos se conocen por los datos pesqueros que las organizaciones pesqueras, lonjas y cofradías proporcionan a los organismos oficiales. Los descartes se estiman por medio de los datos recogidos por observadores a bordo de bu-

ques pesqueros. Para conocer el efecto que ejerce la pesca sobre la población es fundamental conocer el tamaño medio de los individuos que se capturan, lo que se obtiene mediante el muestreo de tallas de los desembarcos y de los descartes.

La mayoría de los recursos pesqueros se distribuyen por aguas de distintos países por lo que su explotación es compartida. Por eso, en la evaluación del estado de explotación de un recurso participan científicos de varios países en grupos de trabajo que se rigen bajo las directrices de las correspondientes organizaciones regionales de pesca. Las evaluaciones de las distintas poblaciones se realizan mediante modelos matemáticos y técnicas estadísticas que describen la dinámica de las poblaciones. Los métodos de evaluación son diversos y se clasifican atendiendo a los requerimientos de datos y a si la dinámica de población está o no está basada en edades. Los más simples, como el modelo de Depleción Corregido por la Captura Media (DCAC), sólo requieren de datos de capturas, mientras que los más complejos, los denominados Modelos de Análisis Integrado, reclaman series históricas de capturas, índices de abundancia y de la composición de la población en edades. Los Modelos de Análisis Integrado, como es el modelo Stock Synthesis, permiten añadir la estructura espacial del stock y enlaces a las condiciones ambientales y del ecosistema en la determinación del estado de los stocks.

La gestión cuantitativa de las pesquerías emplea estos modelos de evaluación para predecir, a corto y medio plazo, el impacto de diferentes medidas de regulación en el estado de las poblaciones y sus capturas. Los resultados de las evaluaciones indican si el ritmo de explotación de cada población es adecuado para mantenerse de manera sostenible. Se pueden distinguir poblaciones en un buen estado (p. ej. jurel y lirio de Galicia), en estado delicado (como caballa de Galicia o fletán y bacalao de Canadá) o sobreexplotadas (merluza, sardina y cigala de Galicia). En función del estado de la población, los científicos proponen medidas de gestión con el objetivo de alcanzar el máximo rendimiento sostenible. La Comisión Europea se basa en los dictámenes científicos para reglamentar las propuestas de captura anuales (TACs y cuotas) y otras medidas técnicas de gestión (vedas, tallas mínimas, etc.). Las posibilidades de captura de la mayoría de las poblaciones son establecidas por el Consejo de Ministros de Pesca de la UE y se reparten entre los estados miembros según el principio de estabilidad relativa. Finalmente, cada país distribuye su cuota nacional entre su sector pesquero por arte, barco y/o comunidad autónoma.

Para saber más...

- Atlas de descartes y guías de peces e invertebrados en el Cantábrico (IEO) <http://fundacion-biodiversidad.es/biodiversidad-marina-y-litoral/proyectos-convocatoria-ayudas/atlas-descartes-flota-arrastre>
- Bode, A., Lavín, A. y Valdés, L. (2012) **Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico del norte de España**. Vol. 5, Instituto Español de Oceanografía, Madrid. 280 pp.
- Guerra Sierra, Á. y Sánchez Lizaso, J.L. (1998) **Fundamentos de explotación de recursos vivos marinos**. Ed. Acribia. Zaragoza. 249 pp.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente – Pesca <http://www.magrama.gob.es/es/pesca/temas/default.aspx>
- La Pesca en la Unión Europea http://ec.europa.eu/fisheries/index_es.htm
- Vargas Yáñez, M., García Martínez, M. C., Moya Ruiz, F., Tel, E., Parrilla, G., Plaza, F., Lavín, A. y García, M. J. (2010) **Cambio climático en el Mediterráneo español**. Vol. 3, Instituto Español de Oceanografía, Madrid. 176 pp.