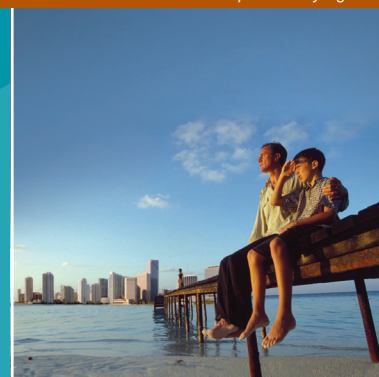


# Caliente, ácido y sin aire: el océano bajo estrés



Este artículo se ha publicado de nuevo con el permiso del Laboratorio Marino de Plymouth<sup>1</sup>

## ¿Cómo se encuentra el ecosistema más grande de la Tierra?

El océano cubre casi tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, contiene el 96 por ciento del espacio colonizado por la vida, proporciona en torno a la mitad del oxígeno que respiramos y es una fuente cada vez más explotada de proteína para una población mundial en rápido crecimiento. Sin embargo, la actividad humana está ejerciendo un impacto sobre este recurso precioso tanto a escala local como regional y global.

En las próximas décadas y siglos la salud del océano va a sufrir una presión creciente debido a los efectos de, al menos, tres factores que interactúan entre sí. El aumento de la temperatura del agua del mar junto con la acidificación y la desoxigenación oceánica producirán cambios importantes en la física, la química y la biología marinas. Estos cambios afectarán al océano de maneras que apenas hoy estamos empezando a comprender.

Es absolutamente necesario que los responsables en la toma de decisiones a nivel internacional entiendan el importante papel que juega el océano en la sostenibilidad de la vida sobre la Tierra, y las consecuencias que un mundo con un elevado nivel de CO<sub>2</sub> tendría para el océano y para la sociedad.

## 1 – Acidificación de los océanos

La acidificación oceánica está directamente causada por el aumento de los niveles de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la atmósfera. Cuando el CO<sub>2</sub> penetra en el océano, rápidamente experimenta una serie de reacciones químicas que incrementan la acidez del agua marina superficial (disminuyendo su pH). Durante los últimos 250 años, el océano ha eliminado ya en torno al 30 por ciento de CO<sub>2</sub> antropogénico, haciendo que el pH decrezca a una velocidad no contemplada desde hace aproximadamente 60 millones de años.

<sup>1</sup> Por C. Turley, T. Keizer, P. Williamson, J.-P. Gattuso, P. Ziveri, R. Monroe, K. Boot y M. Huelsenbeck del Laboratorio Marino de Plymouth, el Programa británico de investigación de la acidificación de los océanos, el Proyecto europeo sobre acidificación oceánica, el proyecto de Acidificación del mar Mediterráneo en un clima cambiante, la Institución Scripps de Oceanografía de la Universidad de California en San Diego, OCEANA; 2013, 6 págs. ISBN: 978-0-9519618-6-5 (disponible en [www.oceanunderstress.com](http://www.oceanunderstress.com)).

Este efecto puede considerarse beneficioso, pues ha ralentizado la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y la velocidad del calentamiento global. Si no fuera por este hundimiento del CO<sub>2</sub> en el océano, sus niveles en la atmósfera serían ya superiores a las 450 ppm. Sin embargo, la continuidad en el tiempo de un cambio tan fundamental y tan rápido de la química oceánica será probablemente perjudicial para la vida marina. No solo causará problemas a muchos organismos con esqueletos o valvas de carbonato cálcico (como las ostras, los mejillones, los corales y algunas especies de plancton) sino que también puede afectar a muchos otros organismos, ecosistemas y procesos, con consecuencias importantes para la sociedad.

Desde el comienzo de la revolución industrial la acidez media de la capa superior de los océanos ya ha disminuido en torno a 0,1 unidades de pH (30% de incremento de acidez) y es de esperar que, si las emisiones de CO<sub>2</sub> continúan produciéndose a la velocidad actual, para finales del presente siglo haya disminuido aproximadamente otras 0,3 unidades de pH más.

## 2 – Calentamiento oceánico

Durante las últimas décadas, el calentamiento oceánico ha sido consecuencia directa del aumento de la temperatura atmosférica debido al "efecto invernadero". Este calentamiento afecta al intercambio de gases entre la superficie del océano y la atmósfera, así como a su transporte y almacenamiento en las aguas más profundas. En un océano más cálido que el actual, el intercambio entre las aguas profundas, ricas en nutrientes, y la superficie del océano, pobre en nutrientes, también disminuirá, especialmente en las zonas tropicales, con el consiguiente detrimento de la productividad oceánica y, por tanto, de la seguridad alimentaria dependiente de las pesquerías.

Es muy probable que el calentamiento oceánico tenga también efectos directos sobre la fisiología de los organismos marinos y, por tanto, altere la distribución geográfica de las especies, incluyendo las comercialmente importantes, bien adaptadas a las condiciones existentes en la actualidad. Por ejemplo, es casi seguro que el incremento de temperatura está contribuyendo a la disminución de la presencia de bacalao en el Atlántico Norte.

El contenido calorífico del océano es inmenso, habiendo ya retenido cerca del 90 por ciento de la energía producida durante

las últimas décadas por el calentamiento del sistema terrestre. Durante los últimos 100 años ya se ha producido un aumento medio de la temperatura de la superficie marina en torno a 0,7 °C, y a finales de este siglo es probable que haya aumentado más de 3 °C en algunas regiones oceánicas.

### 3 – Desoxigenación oceánica

La desoxigenación oceánica consiste en la reducción del oxígeno (O<sub>2</sub>) disuelto en el agua marina. El cambio climático puede influir en los niveles de oxígeno de varias maneras. Esta reducción es segura si el océano se vuelve más cálido, pues las altas temperaturas reducen la solubilidad del oxígeno. Es probable que el calentamiento también contribuya a la creación de un océano más estratificado, con la consiguiente disminución de la aportación de oxígeno desde la superficie a capas más profundas. La acidificación oceánica y la escorrentía rica en nutrientes procedente de arroyos y ríos también pueden incrementar la desoxigenación.

La vida de los peces y de otros organismos marinos depende de que haya suficiente oxígeno en los niveles superficiales, por lo que el descenso de la concentración de oxígeno puede afectarles negativamente. La expansión de zonas con niveles bajos de concentración de oxígeno podría implicar la desaparición de dichos organismos. Sin embargo, otros organismos capaces de tolerar bajos niveles de concentración de oxígeno, particularmente microbios, podrían hacerse más prolíficos, alterando así el equilibrio de los ecosistemas. Los bajos niveles de oxígeno en el océano también podrían incrementar la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera, pues alterarían aquellos mecanismos de retroalimentación que implican al metano y al óxido nítrico.

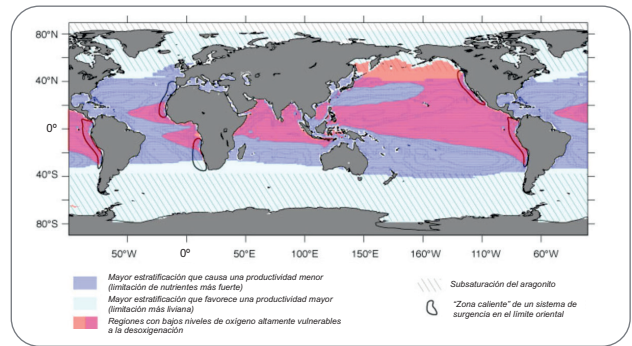
Los actuales modelos del océano predicen descensos de entre el 1 y el 7 por ciento en la cantidad global de oxígeno oceánico a lo largo del próximo siglo. No obstante, existe una gran incertidumbre respecto a la escala y a la localización de estos cambios así como a su impacto ecológico.

### Un triple problema: multiplicidad de factores estresantes

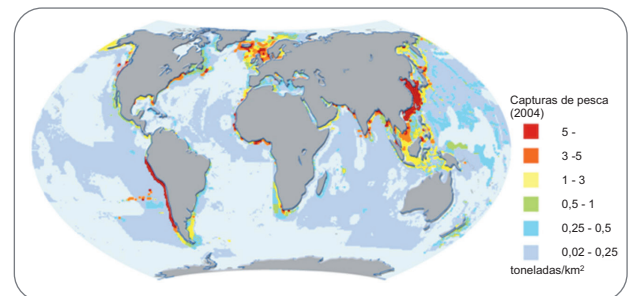
En el futuro, es posible que muchas zonas del océano padezcan simultáneamente los efectos de más de uno de los factores de estrés antes mencionados, pues todos ellos derivan del mismo proceso subyacente: el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico y de otros gases de efecto invernadero. Estas “zonas calientes” no solo serán más cálidas, sino que probablemente también estarán más estratificadas, habrán incrementado su acidez y contendrán menos oxígeno, todo lo cual puede producir un aumento de la presión sobre la vida marina que sería mayor a la suma de las presiones producidas de forma aislada por cada uno de esos factores.

Por ejemplo, la acidificación oceánica puede hacer que las especies se vuelvan más vulnerables al impacto del calentamiento del agua, y los niveles altos de CO<sub>2</sub>, junto con los bajos niveles de oxígeno, pueden ocasionarles dificultades respiratorias. La acción conjunta de estos factores de estrés podría amenazar los ciclos biogeoquímicos, los ecosistemas y los productos y servicios que el océano proporciona a la sociedad en menos tiempo del previsto, incrementando el riesgo al que están expuestas la seguridad alimentaria humana y las industrias que dependen de la producción de los ecosistemas marinos. Más aún, los cambios en el proceso de intercambio

de gases entre la atmósfera y el océano también afectarán al cambio climático.



Nicolas Gruber, *Phil. Trans. R. Soc. A* (2011) 369, 1980-1996



Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2010). UNEP  
*Emerging Issues: Environmental Consequences of Ocean.*

*De manera importante y a la vez preocupante, es probable que estas “zonas calientes” con multiplicidad de factores estresantes coincidan con las áreas de alta productividad en el océano, y que actualmente sustentan las pesquerías más significativas y las de subsistencia en los países en desarrollo (véanse los mapas).*

### Pasos a dar

**Mitigación.** Dado que la acidificación oceánica está fundamentalmente causada por el CO<sub>2</sub>, es preciso adoptar medidas drásticas para reducir sus emisiones. También debe limitarse la acumulación atmosférica de otros gases de efecto invernadero ya que todos ellos contribuyen al calentamiento oceánico y, por consiguiente, a la desoxigenación.

**Adaptación.** Puesto que –incluso si el CO<sub>2</sub> atmosférico pudiera estabilizarse al nivel actual– el mundo está ya abocado a experimentar un calentamiento, una acidificación y una desoxigenación adicionales considerables, es necesario desarrollar estrategias de adaptación. Una estrategia clave es garantizar la máxima capacidad de resiliencia del sistema, por ejemplo, manteniendo, o incluso incrementando, la biodiversidad, y conservando un conjunto de hábitats diversos. También será de gran ayuda reducir la presión de otros factores de estrés ambiental, como son la eutrofización y la contaminación de las costas por sustancias orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, teniendo en cuenta la velocidad sin precedentes a la que se están produciendo los cambios estudiados, es dudoso que las medidas de adaptación por sí solas, sin otras de mitigación, sean capaces de evitar la mayor parte de los perjuicios.

**Investigación.** Es preciso llevar a cabo más investigación a fin de mejorar nuestro conocimiento y comprensión de esos tres factores de estrés conectados entre sí. Aunque la acidificación oceánica se ha convertido recientemente en un tema de investigación prioritaria, el fenómeno de la desoxigenación no ha alcanzado todavía el correspondiente nivel de reconocimiento.

Lo que realmente falta es una perspectiva unificada, desde la que se investiguen los efectos combinados de dos o de los tres factores de estrés actuando de forma simultánea. Gracias a la cooperación interdisciplinar e internacional ya se están poniendo en marcha estudios de laboratorio detallados y experimentos sobre el terreno de monitorización y

modelización a escalas regional y global. Especialmente importante es la necesidad de incrementar de forma global la capacidad de investigación, en particular, la de los países en desarrollo.

A fin de entender mejor los impactos sobre los ecosistemas y sus consecuencias para cada uno de nosotros, la investigación necesitará adoptar cada vez más una aproximación multidisciplinar que incluya las ciencias físicas, biológicas y químicas, así como las ciencias de la Tierra y las ciencias sociales y económicas. Es necesario que la planificación política asuma la relevancia de estos estudios y que exista un intercambio rápido de conocimientos entre los investigadores y las personas responsables en la toma de decisiones.

# Guía de factores de estrés oceánico

Cambios que sufrirán los océanos durante el presente siglo si no se reducen de forma urgente y drástica las emisiones de gases de efecto invernadero.

Factor de estrés	Causas	Resultados	Efectos directos	Impactos	Retroalimentación sobre los océanos
<b>Calentamiento</b> * Área de estudio relativamente madura en lo que se refiere a cambios físicos y fisiología, pero poco estudiada a nivel de ecosistema y bioquímico	* Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero	* Aumento de la temperatura del agua, particularmente en niveles próximos a la superficie * Menor mezcla oceánica debido a una mayor estratificación * El aumento de la escorrentía y de la fusión del hielo marino contribuirá al aumento de la estratificación de las aguas árticas	* Disminución de la solubilidad del dióxido de carbono * Aceleración de los procesos químicos y biológicos * Reposición reducida de nutrientes naturales en aguas más estratificadas	* Presión sobre la fisiología de los organismos, incluida la decoloración de los corales * Migración extensiva de especies * Mayor velocidad de reposición de materia orgánica * Estrés de nutrientes en el fitoplancton, particularmente en aguas cálidas <b>* Cambios que afectan la biodiversidad, las redes y la productividad alimentarias con potenciales consecuencias para la pesca, la protección de las costas y el turismo</b>	* Incorporación reducida de dióxido de carbono en el océano, debido a la disminución de su solubilidad * Aumento del consumo de oxígeno y de la producción de dióxido de carbono, y disminución de la transferencia de oxígeno a capas oceánicas profundas * Disminución potencial del transporte de carbono al interior del océano. * Disminución de la producción primaria excepto en el Ártico, donde la pérdida de hielo marino puede incrementarla
<b>Acidificación</b> * Tema de investigación desarrollado en la pasada década	* Aumento de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera * Enriquecimiento de los nutrientes costeros; las emisiones industriales de hidratos de metano y de gases ácidos pueden contribuir localmente a la acidificación	* Cambio de velocidad sin precedentes en la química oceánica del carbono * Gran parte del océano se volverá corrosivo para los animales con valvas y los corales; estos efectos empezarán a notarse en torno al año 2020 en el Ártico	* Ritmos de calcificación, crecimiento y reproducción reducidos en muchas especies * Cambios en la composición del material orgánico en lo que respecta a sus contenidos de carbono y nitrógeno	* Crecimiento retardado del esqueleto o de las valvas y estrés fisiológico en muchas especies, incluidas sus etapas juveniles * Cambios que afectan a la biodiversidad y a los ecosistemas, así como a los productos y servicios a los que proveen <b>* Las aguas frías emergentes, que actualmente sustentan la pesca y la cría de especies marinas fundamentales, pueden volverse especialmente vulnerables</b>	* Reducción de la absorción oceánica del dióxido de carbono, debido a los efectos de los cambios químicos * Cambios en el transporte del carbono al interior del océano * Aumento del consumo de oxígeno a lo largo de la columna vertical de agua, debido a los cambios en la composición de su materia orgánica
<b>Desoxigenación</b> * Tema de interés emergente; poco estudiado	* Reducción de la solubilidad del oxígeno debido al calentamiento del agua * Reducción de la aportación de oxígeno al interior del océano debido a una menor mezcla de las aguas * Localmente, los vertidos de tierra rica en nutrientes favorecen la eliminación de oxígeno	* Disminuye el oxígeno disponible para la respiración, especialmente en regiones productivas y en el interior del océano * Expansión de zonas con niveles de oxígeno bajo y muy bajo	* Crecimiento y actividad reducidos del zooplancton, de los peces y de otros organismos que consumen oxígeno * Disrupción endocrina	* Presión sobre los organismos que consumen oxígeno * Riesgo de desaparición de especies en áreas con bajo nivel de oxígeno * Impacto sobre el éxito reproductivo <b>* Sustitución de unos organismos por otros con mayor tolerancia a niveles bajos de oxígeno, especialmente microorganismos; inutilización de los ecosistemas en esas áreas</b>	* Aumento de la producción de los dos gases de efecto invernadero, metano y óxido nítrico
<b>Conjunción de los tres factores de estrés</b> * Pocos estudios	* Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, especialmente, del dióxido de carbono	* Mayor abundancia de aguas que, no solo estarán más calientes, sino que también tendrán mayores niveles de acidez y menor contenido de oxígeno	* Deterioro de la fisiología, del equilibrio energético y de la formación de valvas en organismos; ej.: degradación de los arrecifes de coral	* La acidificación oceánica puede reducir la tolerancia térmica de los organismos, aumentando el impacto del calentamiento sobre ellos <b>* Los efectos combinados incrementan todavía más el riesgo para la seguridad alimentaria y para las industrias que dependen de ecosistemas marinos sanos y productivos</b>	* Cambios importantes en la física, en la química y en los ecosistemas oceánicos * Riesgo de que se generen múltiples procesos de retroalimentación positiva que afectarían a la atmósfera, incrementando la velocidad del cambio climático en el futuro