

Acidificación de los océanos: otro límite planetario cruzado

Helen S. Findlay¹ | Richard A. Feely² | Li-Qing Jiang^{3,4} | Greg Pelletier⁵ | Nina Bednaršek^{6,7}

¹Laboratorio Marino de Plymouth, Plymouth, Reino Unido | ²Laboratorio Ambiental Marino del Pacífico NOAA/OAR, Seattle, WA, EE. UU. | ³Instituto Cooperativo para Estudios del Sistema Terrestre por Satélite, Centro Interdisciplinario de Ciencias del Sistema Terrestre, Universidad de Maryland, College Park, Maryland, EE. UU. | ⁴NOAA/NESDIS, Centros Nacionales de Información Ambiental, Silver Spring, Maryland, EE. UU. | ⁵Jubilado del Departamento de Ecología del Estado de Washington, Olympia, WA, EE. UU. | ⁶Instituto Cooperativo de Estudios de Ecosistemas y Recursos Marinos, Universidad Estatal de Oregón, Newport, Oregón, EE. UU. | ⁷Instituto Jožef Stefan, Liubliana, Eslovenia

Correspondencia: Helen S. Findlay (hefi@pml.ac.uk)

Recibido: 23 de diciembre de 2024 | Revisado: 14 de abril de 2025 | Aceptado: 14 de abril de 2025

Financiación: Este trabajo contó con el apoyo de la Agencia Espacial Europea (AO/1-10757/21/I-DT); el Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural (NE/X006271/1); los Programas Globales de Monitoreo y Observación de los Océanos y de Acidificación de los Océanos de la NOAA (GOMO, número de referencia del fondo 100018302); y el OAP NRDD (OAP NRDD); la Agencia de Investigación de Eslovenia (N1-0359); y la Oficina del Programa Climático (NA19NES4320002, NA210AR4310251).

Palabras clave: biodiversidad | química de carbonatos | cambio climático | conservación | marina | acidificación oceánica | límite planetario

ABSTRACTO

La acidificación oceánica se ha identificado en el Marco de Límites Planetarios como un proceso planetario que se aproxima a un límite que podría provocar cambios ambientales inaceptables. Utilizando estimaciones revisadas del estado de saturación de la aragonita preindustrial y productos de modelos de datos de vanguardia, incluyendo incertidumbres y evaluando el impacto en indicadores ecológicos, mejoramos la evaluación del límite planetario de la acidificación oceánica y demostramos que, para 2020, las condiciones oceánicas globales promedio ya habían cruzado el rango de incertidumbre del límite de acidificación oceánica. Este análisis se amplió al océano subsuperficial, revelando que hasta el 60% del océano subsuperficial global (hasta 200 m) había cruzado dicho límite, en comparación con más del 40% del océano superficial global. Estos cambios resultan en disminuciones significativas de hábitats adecuados para importantes especies calcificantes, incluyendo una reducción del 43% en el hábitat de los arrecifes de coral tropicales y subtropicales, de hasta el 61% para los pterópodos polares y del 13% para los bivalvos costeros. Al incluir estas consideraciones adicionales, sugerimos que un límite revisado de reducción del 10% con respecto a las condiciones preindustriales previene de manera más adecuada el riesgo para los ecosistemas marinos y sus servicios; un punto de referencia que fue superado en el año 2000. a través de toda la superficie del océano.

1 | Introducción

Propuesta por primera vez en 2009 (Rockström et al., 2009), la evaluación de los límites planetarios define nueve procesos a gran escala del sistema Tierra y sus límites asociados que, de traspasarse, podrían generar cambios ambientales inaceptables. Estos nueve procesos son: cambio climático, tasa de pérdida de biodiversidad (terrestre y marina), interferencia con los ciclos del nitrógeno y el fósforo, agotamiento del ozono estratosférico, acidificación de los océanos, uso global de agua dulce, cambio en el uso del suelo, contaminación química y carga atmosférica de aerosoles. En 2009 se traspasaron tres límites (Rockström et al., 2009), cifra que aumentó a cuatro en 2015.

(Steffen et al. 2015) y seis en 2023 (Richardson et al. 2023).

Se evaluó que la acidificación de los océanos (OA) aún no ha cruzado el límite, pero se encuentra en el límite del espacio operativo seguro (Richardson et al., 2023). Esta misma conclusión se mantuvo en el Informe de Salud Planetaria publicado en 2024 (<https://www.planetaryhealthcheck.org/>).

OA es el término que se da al cambio a largo plazo en la química de los carbonatos marinos, resultante principalmente de la absorción de dióxido de carbono (CO_2) por los océanos (Caldiera y Wickett, 2003; Orr et al., 2005), lo que provoca un aumento de la acidez oceánica y una disminución de la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}). Esta reducción del CO_3^{2-} influye

Este es un artículo de acceso abierto bajo los términos de la [licencia Creative Commons Attribution](#). Licencia que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que se cite adecuadamente la obra original.

© 2025 El/Los autor(es). Biología del Cambio Global, publicado por John Wiley & Sons Ltd. Este artículo ha sido elaborado con la colaboración de empleados del gobierno de EE. UU. y su trabajo es de dominio público en EE. UU.

Formación y disolución del mineral carbonato de calcio (CaCO_3) (R. A. Feely et al. 2004, 2008; Gangsto et al. 2008). Como CO_3^{2-} concentración La saturación de CaCO_3 disminuye, lo que puede provocar la disolución. Por el contrario, cuando el CO_3^{2-} Es abundante, el agua de mar está sobresaturada y se facilita la formación de minerales de CaCO_3 . La precipitación abiótica de minerales de CaCO_3 solo ocurre a niveles muy altos de Ω (Chave y Suess, 1970), y la mayor parte del CaCO_3 en los océanos se forma mediante procesos biogénicos. Existe en varias fases minerales, las más frecuentes son aragonito y calcita, siendo el aragonito aproximadamente un 50% más soluble que la calcita (Mucci 1983).

La acidificación de los océanos (OA) puede afectar gravemente a los organismos marinos por su impacto directo en la fisiología, el crecimiento, la supervivencia y la reproducción (Doney et al., 2020; Findlay y Turley, 2021). Además, los calcificadores marinos que producen conchas o esqueletos de CaCO_3 , como algunos corales, crustáceos, moluscos, fitoplancton, zooplancton y algas, corren un riesgo indirecto adicional debido a la OA, ya que la disminución de Ω aumenta el coste energético de la construcción o el mantenimiento de sus estructuras de CaCO_3 . Estas, al exponerse a condiciones de baja Ω (generalmente subsaturadas), pueden experimentar una mayor disolución (RA Feely et al., 2016; Findlay et al., 2011; Leung et al., 2020).

Las condiciones de Ω oceánico varían significativamente a nivel mundial, con niveles en las regiones tropicales más del doble que en las regiones polares (Feely et al., 2023; Jiang et al., 2015). Estos gradientes regionales y estacionales se deben al CO_2 impulsado por la temperatura. solubilidad, lo que permite que las aguas más frías de latitudes altas almacenen más CO_2 , junto con otros factores que incluyen la circulación del carbono desde la superficie hacia aguas más profundas, los aportes minerales de la tierra y la dilución del agua dulce (Jiang et al. 2019; Orr et al. 2005). La vida marina está expuesta a estos gradientes que varían regionalmente, a los cuales se ha adaptado evolutivamente (Vargas et al., 2022), lo que resulta en una amplia variabilidad en las respuestas observadas a la acidificación orgánica (OA) en experimentos de laboratorio. Sin embargo, la envolvente de las condiciones generales que experimentan los organismos también está cambiando debido a la OA, lo que puede complicar la ampliación de experimentos con una sola especie a predicciones de ecosistemas. Esto es particularmente cierto si consideramos otros desafíos de la ampliación, como los efectos de la incubación, la falta de variabilidad natural y la falta de adaptación y/o aclimatación.

Por lo tanto, comprender el estado, las tendencias y los impactos biológicos (o implicaciones) de la OA a nivel global y regional es fundamental para determinar un espacio operativo seguro a escala planetaria en el que se conserven los ecosistemas y hábitats plenamente operativos. Determinar este espacio seguro requiere más que simplemente considerar el cambio químico. Cruzar un límite implica un mayor riesgo de que los ecosistemas marinos se vean afectados por condiciones desfavorables, lo que resulta en una alteración de su funcionamiento y, en última instancia, tiene graves consecuencias para las sociedades que dependen vitalmente de estos ecosistemas para obtener diversos bienes y servicios provisionales, culturales y climáticos (Pörtner et al., 2019).

El estado de saturación de aragonito (Ω_{Arag}) ha surgido como un indicador clave para OA, reflejando las tendencias de precipitación/disolución de CaCO_3 , así como su asociación con calcificadores marinos. En consecuencia, se eligió la superficie media global Ω_{Arag} como indicador de OA en las evaluaciones de los límites planetarios (Rockström et al., 2009). El límite se fijó en el 80 % del valor de Ω_{Arag} preindustrial, es decir, una reducción del 20 % con respecto al preindustrial.

Promedio de la superficie oceánica. Este nivel se eligió con base en dos criterios: primero, para mantener las aguas superficiales de latitudes altas por encima de la subsaturación de Ω_{Arag} ; y segundo, para garantizar condiciones adecuadas para la mayoría de los sistemas de arrecifes de coral de aguas cálidas (Rockström et al., 2009). En el marco de los límites planetarios (Richardson et al., 2023; Rockström et al., 2009; Steffen et al., 2015), el límite de OA es relativamente poco refinado en comparación con otros procesos planetarios, que a menudo incorporan elementos de incertidumbre y/o complejidad regional que influyen en el funcionamiento planetario.

De hecho, cinco de los nueve límites se desarrollaron de esta manera durante la segunda evaluación (Steffen et al., 2015) en reconocimiento de que "los cambios en las variables de control a nivel subglobal pueden influir en el funcionamiento a nivel del sistema terrestre, lo que indica la necesidad de definir límites subglobales que sean compatibles con la definición de límite a nivel global". Por ejemplo, el "proceso de cambio de agua dulce" utiliza el límite superior de la variabilidad preindustrial como un enfoque de precaución, reconociendo las incertidumbres relacionadas tanto con los datos como con la posición exacta del límite. Mientras que el "proceso de flujos biogeoquímicos" tiene un límite tanto global como regional, y el "proceso de cambio del sistema terrestre" tiene un límite global, así como límites de biomas específicos (Richardson et al., 2023). Por el contrario, el límite de OA utiliza un único valor preindustrial para Ω_{Arag} sin incertidumbres asociadas, ni ninguna consideración de las diferencias regionales en la manifestación de OA y la contribución regional a la salud oceánica global y al funcionamiento planetario. Esto a pesar de que Steffen et al. (2015) reconocen que Ω_{Arag} es espacialmente heterogéneo y que los criterios para definir el límite están relacionados con regiones del océano global (es decir, aguas polares y corales subtropicales), que están cambiando a ritmos diferentes (Feely et al. 2023; Feely et al. 2024; Ma et al. 2023).

Además de los cambios regionales en la superficie, investigaciones recientes indican que se han producido grandes cambios en los sistemas carbonatados en el subsuelo (es decir, por debajo de los 10 m superiores, medidos rutinariamente mediante amarres, barcos de oportunidad y teledetección), donde la absorción antropogénica combinada de CO_2 y la respiración local de la materia orgánica interactúan para reducir Ω_{Arag} y el pH, y se combinan con el cambio relacionado con la OA del subsuelo (Fassbender et al., 2023; Feely et al., 2024; Harris et al., 2023; Müller y Gruber, 2024). Además, también se observa una mayor frecuencia de eventos compuestos del subsuelo (olas de calor marinas, disminución del OD, el pH y Ω_{Arag}) que impactan sinérgicamente la salud del océano (Gruber et al., 2021; Hauri et al., 2024).

Establecer un límite de OA que reduzca los riesgos de impacto significativo y proteja o sustente especies y ecosistemas marinos clave mejora un límite definido simplemente por un umbral químico (es decir, $\Omega_{\text{Arag}} = 1$). El marco de límites planetarios abordó inicialmente esto para la OA al considerar el umbral de Ω_{Arag} para el crecimiento marginal de los arrecifes de coral de aguas cálidas (Rockström et al., 2009). Sin embargo, en los últimos años, la investigación sobre umbrales e indicadores se ha desarrollado y ampliado, mediante la cual se ha evaluado el deterioro biológico frente a los cambios en la química de los carbonatos (OA) para múltiples grupos funcionales clave mediante la implementación del umbral (p. ej., Bednaršek et al., 2019). Incluir indicadores biológicos adicionales en la evaluación de límites es especialmente válido dado que algunas especies se ven afectadas por las condiciones de OA en el océano actual (p. ej., pterópodos [Bednaršek et al., 2021]; Bednaršek

et al. 2012b), decapod crab larvae (Bednaršek et al. 2020), gas-tropods (León et al. 2020) and corals (Manzello 2010)).

Utilizando las últimas observaciones, resultados de modelización y evaluaciones biológicas, exploramos si establecer el límite en una reducción del 20 % con respecto a las condiciones preindustriales proporciona un límite suficientemente seguro respecto a las consecuencias de la OA. En primer lugar, examinamos las últimas condiciones superficiales globales en comparación con la evaluación de Richardson et al. (2023), utilizando específicamente los productos de datos de modelos de vanguardia e incluyendo, de manera importante, las incertidumbres tanto en el límite como en el valor actual. También evaluamos los cambios regionales para evaluar mejor los dos criterios (océanos polares y corales tropicales) utilizados originalmente para definir el límite de la OA. A continuación, utilizamos nuevos productos de modelos de datos del subsuelo para considerar cómo ha cambiado el océano subsuperficial hasta la fecha y reconocer la heterogeneidad espacial vertical presente en los océanos. Finalmente, evaluamos estas condiciones cambiantes en relación con ejemplos adicionales de especies sensibles a la OA que sirven como indicadores biológicos, para determinar qué nivel podría considerarse finalmente seguro para los ecosistemas marinos y el funcionamiento planetario, incluyendo la seguridad alimentaria y el secuestro de carbono.

2 | Materiales y métodos

2.1 | Modelos de evaluación global y regional

2.1.1 | Datos del modelo de superficie

Jiang et al. (2023) describen simulaciones de modelos para la superficie oceánica. Están disponibles (Jiang et al., 2022) como productos cuadrículados en NetCDF, en los Centros Nacionales de Información Ambiental de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los datos utilizados en este análisis fueron las medianas de conjuntos multimodelo y sus desviaciones estándar asociadas.

(Tablas S1 y S2; [Jiang et al. 2022]).

2.1.2 | Datos del modelo del subsuelo

Se generó un nuevo producto de fusión de datos de modelos que abarca 10 indicadores globales de OA subsuperficial a niveles de profundidad estandarizados de 50 m, 100 m y 200 m (Jiang, 2024) , siguiendo el mismo enfoque de Jiang et al. (2023). Estos indicadores incluyen: fugacidad del dióxido de carbono, pH a escala total, concentración total de iones de hidrógeno, concentración de iones de hidrógeno libre, concentración de iones de carbonato, estado de saturación de aragonito, estado de saturación de calcita, factor de Revelle, contenido total de carbono inorgánico disuelto y contenido total de alcalinidad. Este producto presenta la evolución de estos indicadores de OA en cuadrículas oceánicas superficiales y subsuperficiales globales con una resolución de 1°×1°. Se presenta como promedios decenales para cada período de 10 años, comenzando con las condiciones preindustriales en 1750, pasando por las condiciones históricas de 1850 a 2010, y extendiéndose a cuatro escenarios futuros basados en Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) de 2020 a 2100. Las SSP consideradas son SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Los resultados de este producto se extrajeron de 14 Modelos del Sistema Terrestre (ESM) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) y un producto de datos reticulados creado por Lauvset et al. (2016). Los datos utilizados en este análisis fueron las medianas de conjuntos multimodelo.

y sus desviaciones estándar asociadas (Tablas S1 y S2; [Jiang 2024]).

2.1.3 | Elección del valor preindustrial y consideración de incertidumbres

El límite planetario OA original utilizó un Ω_{Arag} preindustrial Valor de 3,44, sin referencia asociada. Sin embargo, creemos que este valor proviene de los modelos CMIP3, como se menciona en el informe de la Royal Society de 2005 (Raven et al., 2005), que utiliza una concentración atmosférica de CO2 preindustrial de 280 ppm, que se remonta a Caldiera y Wickett (2003). Dado que el CO2 atmosférico se utiliza para determinar la dinámica del carbono oceánico en la mayoría de los modelos ESM, y que la mayoría de estos modelos comienzan sus simulaciones históricas en el año modelo 1850, la elección de la concentración de CO2 es importante.

La concentración de CO2 preindustrial se deriva de registros de núcleos de hielo, que datan desde la actualidad hasta aproximadamente el año 1000 d.C. Etheridge et al. (1996) sugieren que la proporción de mezcla de CO2 preindustrial durante ese período se encuentra en el rango de 275 a 284 ppm, con una incertidumbre en las proporciones de mezcla de 1,2 ppm. También destacan que «... las variaciones naturales de CO2 de esta magnitud hacen que sea inadecuado referirse a un único nivel de CO2 preindustrial» (Etheridge et al. 1996). Más recientemente, el IPCC proporcionó valores de CO2 preindustrial dentro de un rango de 278,3 ± 2,9 ppm en 1750 y 285,5 ± 2,1 ppm en 1850 (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2023). Por esta razón, consideramos este rango de CO2 concentraciones similares a las condiciones preindustriales, junto con las incertidumbres del CO2 (1,2 ppm) para agregar un rango de incertidumbre al límite en lugar de utilizar un valor único.

En este estudio, utilizamos la aproximación de Jiang et al. (2023) a los indicadores de OA de 1750 y 1850, dado que se basan en datos de CO2 atmosférico obtenidos a partir de núcleos de hielo de 1752 (276,39 ppm) y 1852 (288,57 ppm) (Etheridge et al., 1996; MacFarling-Meure et al., 2006), y, por lo tanto, representan el rango de CO2 observado en la era preindustrial .

En consecuencia, el rango de Ω_{Arag} en la era preindustrial es de 3,44 a 3,57. Utilizando las condiciones preindustriales promedio de temperatura, salinidad y alcalinidad del océano para esas fechas (Tabla S4), propagamos la incertidumbre de 1,2 ppm en las mediciones de CO2 para obtener un término de incertidumbre adicional para Ω_{Arag} para el límite preindustrial, que es de 0,18 para el océano global promedio, pero varía de 0,09 a 0,21 en las regiones oceánicas. El cambio porcentual entre las condiciones actuales y preindustriales, y la incertidumbre asociada, se pueden calcular entonces (sección 2.1.4). Cuando se requiere un único valor límite, por ejemplo, para calcular el cambio en la extensión del área que ha superado un nivel específico, el valor superior de Ω_{Arag} preindustrial ($\Omega_{Arag} = 3,57$) se utiliza como nivel de precaución que reconoce

Estas incertidumbres.

2.1.4 | Cálculo del cambio porcentual y errores propagados

El cambio porcentual en Ω_{Arag} se calculó entre la época preindustrial y la actualidad (década de 2020) a partir de las medianas de múltiples modelos (x e y) y sus desviaciones estándar asociadas (σ_x y σ_y) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Cambio porcentual} = \frac{\bar{y}}{(1 - \bar{x})} \times 100 \quad (1)$$

La fórmula para la propagación del error de la relación $R = \frac{\bar{y}}{1 - \bar{x}}$ es:

$$(\Delta R)^2 = (\Delta \bar{x})^2 + (\Delta \bar{y})^2 \quad (2)$$

Reorganizado a:

$$\Delta R = \frac{\bar{y}}{\bar{x}^2} \sqrt{(\Delta \bar{x})^2 + (\Delta \bar{y})^2} \quad (3)$$

El error en el cambio porcentual es entonces: $\Delta R \times 100$.

Los errores de límite se calcularon utilizando las mismas ecuaciones, asumiendo $\bar{y} = 0,8\bar{x}$ y, utilizando las desviaciones estándar de aragonito preindustrial propagadas para el límite, \bar{y} .

2.2 | Evaluación de indicadores biológicos de especies sensibles a la acidificación de los océanos

Los umbrales biológicos se definen como los puntos de inflexión a partir de los cuales se espera que comiencen a producirse efectos biológicos perjudiciales y pueden indicar consecuencias agudas o crónicas para la salud de las especies una vez superadas las condiciones (COI-UNESCO 2022). Los umbrales son herramientas indispensables para evaluar las condiciones ambientales que pueden agravar los riesgos para las especies marinas sensibles y sus hábitats.

Los umbrales no solo buscan lograr significancia estadística, sino también captar respuestas ecológicamente significativas. Dichos umbrales pueden fundamentar eficazmente las decisiones de gestión y políticas, sirviendo como herramientas de comunicación cruciales para las partes interesadas. La desventaja de estos umbrales es que no abarcan toda la complejidad de la adaptación y modulación local que introduce el cambio simultáneo en múltiples condiciones ambientales (Boyd et al., 2018).

Aquí combinamos el uso de umbrales que se han determinado

ya sea mediante evidencia científica sólida proveniente de estudios de impacto de laboratorio o de campo, o de estudios que utilicen metaanálisis y evaluación de expertos (sección 2.2.1), con una evaluación de la envoltura ambiental para cada especie (sección 2.2.3) para determinar un nivel que, una vez cruzado, represente condiciones marginales para ese organismo.

2.2.1 | Selección de umbrales existentes

Para la selección de umbrales, es importante comprender su grado de certeza. Siempre que sea posible, los umbrales se caracterizan por puntuaciones de confianza, con métricas tomadas del modelo de confianza del IPCC (Mastrandrea et al., 2010), y se determinan con base en la concordancia de hechos y la evidencia. La puntuación de confianza, en última instancia, define el nivel de (in)certidumbre en torno a la implementación del umbral. Los umbrales de confianza altos tienen una alta certeza en la interpretación de la sensibilidad de las especies y, por lo tanto, se recomienda que solo se implementen umbrales con una certeza media o alta. Sin embargo, en muchos casos, cuando los umbrales no se sometieron a consenso de expertos, como

Los estudios de umbral no necesariamente han asignado (aún) puntuaciones de confianza ni tienen un nivel de incertidumbre asociado. En estos casos, se consideran los umbrales cuando se han utilizado más ampliamente en las comunidades científicas y de gestión de políticas (p. ej., Barton et al., 2015; Ward et al., 2022).

Al evaluar y utilizar la superación de umbrales en este estudio, estos umbrales se toman como una guía del impacto potencial o la vulnerabilidad, más que como un límite absoluto de un proceso biológico a escala global. Esto refleja un principio de precaución y reconoce que las variaciones a nivel poblacional pueden alterar la sensibilidad de las especies en determinadas condiciones. Nos centramos en tres grupos con sensibilidad conocida a la acidificación de los océanos (OA), que son importantes social y económicamente, y que tienen importancia global para el funcionamiento del planeta: corales de aguas cálidas, pterópodos y bivalvos (ostras y mejillones).

Reconocemos que el factor específico de los impactos entre la química de carbonatos (OA) y la condición biológica o los procesos biogeoquímicos a menudo se desconoce, está correlacionado o es resultado de una respuesta indirecta. Por ejemplo, podría ser el pH o el CO_2 , en lugar de Ω_{Arag} , el principal factor de impacto. Debido a la complejidad que implica desentrañar los factores principales de la respuesta, así como la conversión entre parámetros de la química de carbonatos (especialmente cuando no se dispone de todos los datos necesarios en las publicaciones para ello), presentamos aquí umbrales en función de Ω_{Arag} (Waldbusser et al., 2015) para alinear el indicador químico con las evaluaciones previas de los límites planetarios (Richardson et al., 2023).

Los arrecifes de coral de aguas cálidas son un indicador clave, ya que representan un ecosistema oceánico invaluable. Proporcionan hábitat para una enorme cantidad de biodiversidad, albergando un exceso estimado de 3 millones de especies; sustentan los medios de vida a través del turismo y la pesca, proporcionando alimento a más de mil millones de personas y una fuente de aproximadamente el 25% de la captura mundial de peces; y brindan protección costera contra tormentas, inundaciones y erosión del suelo a más de 275 millones de personas que viven cerca de ellos (Spalding y Brown 2015). El umbral para los arrecifes de coral de aguas cálidas que ya se incluyó en la evaluación de límites planetarios de OA (Rockström et al. 2009) también se utiliza aquí. El umbral de $\Omega_{\text{Arag}} = 3,5$ se basa en la definición del inicio de las condiciones marginales para los arrecifes de coral de aguas cálidas definida por Guinotte et al. (2003), derivada de un análisis de estilo de envoltura ambiental (Kleypas et al. 1999).

Los pterópodos se consideran especies clave en las regiones polares, con una importante importancia ecosistémica (Bernard y Froneman, 2009) y biogeoquímica, incluyendo un componente importante de la bomba de carbono (Anglada-Ortiz et al., 2021; Manno et al., 2010), y se reconocen como importantes indicadores de OA (Bednaršek et al., 2014). Niveles actuales de Ω_{Arag} En latitudes altas, ya están causando una grave disolución de la concha de los pterópodos (Bednaršek et al., 2023). El umbral para los pterópodos representa una disolución de la concha leve o grave, lo que sirve como alerta temprana (leve: $\Omega_{\text{Arag}} = 1,5$) y como indicador de deterioro fisiológico adicional (grave: $\Omega_{\text{Arag}} = 1,2$). Estos umbrales de disolución de conchas tienen puntajes de confianza altos (Bednaršek et al. 2019), y los valores están respaldados por múltiples estudios de campo y experimentales tanto en las regiones polares como en el ecosistema de la corriente de California (Bednaršek et al. 2014, 2012b).

Los bivalvos se incluyen aquí como organismos indicadores clave que son componentes críticos de los ecosistemas costeros. Proporcionan una fuente de alimento y proteína, con una producción de bivalvos que vale 20.6 mil millones de dólares por año en todo el mundo; mejoran la calidad del agua al filtrar partículas, lo que ayuda a equilibrar los nutrientes y el crecimiento del fitoplancton; crean hábitats que son importantes zonas de crianza, pero también ayudan a estabilizar las costas; finalmente, los bivalvos también son importantes para una serie de otras industrias clave, como su uso en materiales de construcción, uso medicinal y producción de perlas (Filipa Mesquita et al. 2024). Se han investigado los impactos de OA en varias especies de bivalvos, aunque aún no se ha determinado un umbral específico. Una gran fracción de los estudios de impacto de bivalvos se han realizado en etapas de vida larvaria, con el inicio de los impactos ocurriendo en niveles de Ω Arag entre 1.3 y 1.9. El impacto más aplicado y validado se observa en la ostra del Pacífico (*Magallana gigas*), ampliamente estudiada debido al impacto del OA en la producción larvaria frente a la costa oeste de Norteamérica. Se demostró que la producción larvaria tiene una relación negativa con Ω Arag (Barton et al., 2012, 2015). Utilizando esta relación, determinamos el valor de Ω Arag en el cual la producción relativa es cero y lo utilizamos como umbral (Ω Arag = 1,75) a partir del cual la producción relativa es mínima o inexistente. Otras especies de bivalvos, a partir de estudios de laboratorio, tienen posibles umbrales subletales relacionados con el crecimiento y la calcificación (por ejemplo, la ostra *Olympia* (*Ostrea lurida*) tiene un inicio de impactos en Ω Arag de 1,4 (Hettinger et al. 2012); la ostra oriental (*Crassostrea virginica*) tiene un inicio de impactos en Ω Arag de 1,83 (Gobler y Talmage 2014); y el mejillón azul (*Mytilus californianus*) tiene un inicio de impactos en Ω Arag de 1,8 (Gaylord et al. 2011)).

2.2.2 | Distribución geográfica y envoltentes ambientales asociadas

La secretaría del IPBES define la envoltura ambiental de una especie como el conjunto de entornos en los que se cree que la especie puede persistir. Estas envolturas se utilizan en la modelización de nichos ambientales comparando el uso del hábitat de las especies con las condiciones ambientales locales para determinar la idoneidad relativa de áreas geográficas específicas para una especie dada (p. ej., AquaMaps, (Ready et al. 2010)). La base de datos del Sistema de Información sobre Biodiversidad Oceánica (OBIS) se utilizó para recopilar datos de ocurrencia de cada una de las especies elegidas: *Magallana gigas* ((OBIS 2023b) y Tabla S5); *Mytilus californianus* ((OBIS 2023c) y Tabla S6) y *Limacina helicina* ((OBIS 2023a) y Tabla S7). Los datos de ocurrencia de arrecifes de coral de aguas cálidas provinieron del Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA-WCMC, Centro WorldFish, WRI, TNC 2021). Los datos se descargaron y luego se ordenaron. Cabe destacar que estos conjuntos de datos no implican la ausencia de una especie determinada en otras ubicaciones, sino que simplemente representan dónde se han observado realmente las especies y pueden utilizarse con fines cuantitativos. Posteriormente, se realizó una segunda revisión para verificar la validez de los datos y eliminar registros duplicados según la latitud, la longitud y la fecha de cada observación. Los valores de ubicación se utilizaron posteriormente para extraer información ambiental.

Datos mentales (parámetros de temperatura, salinidad y química de carbonatos) del conjunto de datos OceanSODA-ETHZv1 (Gregor y Gruber, 2020). El conjunto de datos OceanSODA-ETHZv1.2023 es un producto que proporciona datos con una escala espacial y mensual de $1^\circ \times 1^\circ$.

Resolución temporal entre 1982 y 2022 (Gregor y Gruber, 2021). Cabe destacar que este conjunto de datos solo dispone de valores de superficie. Las envoltentes ambientales globales se generaron utilizando la coincidencia de ubicación más cercana entre el conjunto de datos de ocurrencia y el conjunto de datos OceanSODA-ETHZv1.2023 para

Cada especie. Se generaron estadísticas a partir de los datos extraídos (Tablas S14-S17) y se generaron histogramas (Figura S7).

El análisis se realizó en R v4.1.3.

2.2.3 | Validación cruzada de umbrales y sobres ambientales

El objetivo de utilizar una evaluación combinada es validar de forma cruzada estos valores para obtener la interpretación más completa posible de la respuesta, y por ende, del indicador, a la OA. La combinación del modelado del nicho ambiental con el enfoque de umbrales puede respaldar la forma en que la información sobre las respuestas fisiológicas, derivada principalmente de experimentos de laboratorio, puede relacionarse con la distribución de la presencia de una especie.

Esto puede brindar información sobre cuándo las condiciones por debajo de los umbrales fisiológicos se traducen en ausencias poblacionales. Este enfoque es relativamente novedoso, pero tiene importantes implicaciones para detectar respuestas de alerta temprana más allá de las cuales cabría esperar impactos a nivel poblacional (es decir, cuando los umbrales fisiológicos se superponen con los valores de ausencia más altos del modelado de nicho).

Utilizando los conjuntos de datos completos disponibles, tanto de ocurrencia como ambientales, proponemos utilizar el percentil 10 de la distribución de la envoltente ambiental como la validación correspondiente de los umbrales de laboratorio. Utilizamos el percentil 10 para proporcionar una evaluación estandarizada de lo que puede considerarse exposición extrema, basándonos en las definiciones utilizadas en olas de calor atmosféricas y marinas y en los extremos de OA (que utilizan el percentil 90 para las olas de calor y el percentil 10 para la OA [Gruber et al., 2021; Hobday et al., 2016]). El percentil 10 ocurre en Ω Arag=3,5 para corales de aguas cálidas, Ω Arag=1,1 para pterópodos y Ω Arag=1,8 y Ω Arag=1,9 para las dos especies de bivalvos investigadas aquí (*Magallana gigas* y *Mytilus californicus*, respectivamente) (Tablas S14–S17, Figura S7).

Este valor del percentil 10, combinado con la evaluación de los umbrales en la literatura, aumenta la confianza en la validez de estos valores como representativos de los umbrales biológicos vitales más allá de los cuales se espera que comiencen a ocurrir efectos biológicos perjudiciales (COI-UNESCO 2022). En este contexto, utilizamos la evaluación combinada (considerada como la mediana de todos los valores (umbral y envoltentes ambientales) derivados para cada grupo) para obtener valores indicadores como: Ω Arag = 3,5 como condiciones marginales para corales de aguas cálidas, Ω Arag = 1,2 como condiciones marginales para pterópodos (pero también incluimos Ω Arag = 1,5 como el nivel suave) y Ω Arag = 1,8 como condiciones marginales para bivalvos.

2.2.4 | Aplicación de condiciones marginales a datos de observación biogeoquímica

Posteriormente se calcularon varios diagnósticos utilizando la evaluación biológica de las condiciones marginales relacionadas con Ω Arag:

- El porcentaje de área oceánica que presenta condiciones marginales:
 - En la era preindustrial (utilizando el nivel superior como medida de precaución condicional)
 - En la actualidad (2020 d. C.)
 - Al aplicar una reducción del 20% en Ω Arag desde antes valores industriales
 - Al aplicar una reducción del 10% en Ω Arag desde antes valores industriales
- El cambio en la proporción del área que se encuentra en condiciones marginales entre la época preindustrial y la actualidad (2020 d. C.)
- La reducción porcentual requerida con respecto a la etapa preindustrial antes de que se alcanzara en promedio el umbral de condiciones marginales

Estos diagnósticos se aplicaron a cada uno de los grupos de indicadores utilizando los resultados del modelo para las aguas superficiales globales y luego los datos específicos de la región y la profundidad utilizando los resultados del modelo del subsuelo.

A partir de la evaluación de la literatura y los mapas de presencia de cada especie, se seleccionaron las regiones donde los grupos indicadores seleccionados son más abundantes o desempeñan un papel relevante en el ecosistema. Los corales de aguas cálidas se encuentran en las latitudes bajas, entre 40° S y 40° N, a profundidades de 0 a 25 m.

Para los pterópodos, elegimos dos regiones geográficas: las regiones polares (Ártico definido por el área al norte de 65° N, Océano Antártico definido por el área al sur de 45° S) y el ecosistema de la corriente de California (definido por el cuadro geográfico de 47,5° N a 21,5° N, 108,5° O a 132,3° O (<https://www.marineregion.org/gazetteer.php?p=details&id=8549>), y restringiéndose a un radio de 300 km desde la costa), a profundidades de 0 a 200 m (Akiha et al. 2017; Bednaršek et al. 2012a; Hunt et al. 2008; Kobayashi 1974; Zamelczyk et al. 2021). Para los bivalvos, elegimos utilizar los océanos costeros globales (definidos como dentro de los 300 km desde la costa), a profundidades de 0 a 25 m (Gabaev 2015; Knights et al. 2006; Weinstock et al. 2018).

La media ponderada por área y las desviaciones estándar de Ω Arag se calcularon con MATLAB las coordenadas de las celdas de la cuadrícula del modelo dentro de cada región de interés en cada capa de profundidad (0 m, 25 m, 50 m, 100 m y 200 m). El Ω Arag en la capa de profundidad de 25 m se estimó como la media aritmética de las capas de 0 m y 50 m. La covarianza ponderada por área de Ω Arag entre capas se calculó con MATLAB mediante weightedcorr (Pozzi et al., 2012).

Las incertidumbres en el Ω Arag integrado en profundidad, que explica la covarianza entre capas, se propagaron mediante el método delta, implementado en la biblioteca de incertidumbres de Python. El porcentaje de superficie oceánica que cruzó cada umbral biológico se calculó como la suma de las áreas de todas las celdas de la cuadrícula del modelo de 1°×1° que cruzaban el umbral, dividida por la superficie total de cada región mediante MATLAB. Las distribuciones observadas de cada grupo de indicadores se superpusieron utilizando datos de OBIS para todas las especies, excepto los corales de aguas cálidas, que se obtuvieron del PNUMA-WCMC (sección 2.2.2). Las Figuras S3-S6 muestran mapas de la aplicación del umbral de las condiciones preindustriales, las condiciones del año 2020 y las reducciones del 10% y el 20% con respecto a las condiciones preindustriales, para cada uno de los grupos de indicadores descritos anteriormente y detallados en las Tablas S8.

y S9. Los resultados del umbral de pterópodos en cada capa de profundidad individual (0, 50, 100 y 200 m) también se muestran en las Tablas S10–S13.

3 | Resultados

3.1 | Superficie global Ω Arag como límite planetario

Richardson et al. (2023) estimaron el promedio global del año 2022 Ω Arag (= 2,8) a partir del valor promedio climatológico de 3,03 en el año 2000 y la disminución global correspondiente de 0,1 por década dada por Jiang et al. (2015). Este cálculo resultó en la conclusión de que hubo una disminución del 19% con respecto a las condiciones preindustriales (utilizando el valor preindustrial único [1850 d. C.] de 3,44) y, por lo tanto, que el límite (de reducción del 20%) no se había cruzado. La síntesis más reciente de los datos in situ y del modelo del océano superficial global sugiere que la media global actual de Ω Arag es de $2,90 \pm 0,06$. Estos valores actualizados sugerirían que OA está ligeramente más lejos de cruzar el límite de lo que Richardson et al. (2023) propusieron (2,8 [reducción del 19%] frente a 2,90 [reducción del 16%]). Sin embargo, al incorporar la incertidumbre en torno al valor preindustrial y, por consiguiente, al límite, se obtiene un valor preindustrial de Ω Arag de $3,51 \pm 0,065$ [rango: 3,44 a 3,57], lo que resulta en un límite de Ω Arag de $2,80 \pm 0,05$ (Tabla S3). Estas incertidumbres pueden propagarse para calcular el error en el cambio porcentual a lo largo del tiempo.

La inclusión de esta incertidumbre sitúa el nivel medio global actual de OA superficial en $17,3\% \pm 5,0\%$, lo que está por debajo del promedio del límite, pero cae dentro de las nuevas incertidumbres del límite ($20\% \pm 5,3\%$) (Tabla 1, Figura 1a).

Además de las diferencias entre los conjuntos de modelos, las diferencias regionales en el Ω Arag absoluto, así como en la tasa de disminución de Ω Arag, pueden contribuir a la variabilidad en torno al promedio y deben tenerse en cuenta. Para delinear con más detalle estas diferencias regionales, realizamos una evaluación a escala regional que transforma y mejora las estimaciones de límites globales. Utilizando datos regionales, evaluamos si las principales cuencas oceánicas han cruzado, respectivamente, el límite del 20% (Tabla 1, Figura 1a). Los valores promedio de la superficie muestran que cuatro de las siete cuencas oceánicas han...

Cruzaron el límite: el Ártico (reducción del $26,0\% \pm 15,2\%$), el Pacífico Norte (reducción del $22,1\% \pm 6,4\%$), el Océano Antártico (reducción del $21,8\% \pm 4,6\%$) y el Atlántico Norte (reducción del $20,1\% \pm 6,5\%$). Sin embargo, todas las cuencas cruzaron el límite inferior de las incertidumbres de los límites (Tabla 1, Figura 1a).

Utilizando el valor preindustrial superior como valor de precaución, el porcentaje (mediana \pm DE de múltiples modelos) de superficie que ha cruzado el límite del 20% en 2020 (en comparación con 1750) fue superior al $40\% \pm 9,7\%$ del océano global (Figura 1b), y fue del $86,8\% \pm 15,1\%$ del Océano Antártico, el $83,6\% \pm 18,6\%$ del Pacífico norte, el $78,2\% \pm 11,1\%$ del Ártico, el $63,1\% \pm 22,1\%$ del Atlántico norte, el $22,9\% \pm 12,4\%$ del Pacífico central, el $19,7\% \pm 10,7\%$ del océano Índico y el $15,1\% \pm 11,5\%$ del Atlántico central (Figura 1b).

3.1.1 | Cómo evitar que los océanos polares alcancen la subsaturación

El primer criterio utilizado para establecer el límite planetario de la OA (Rockström et al., 2009) fue que las condiciones promedio globales serían suficientes para evitar que las aguas polares se subsaturaran. Si bien casi todos los océanos polares superficiales han experimentado una reducción de Ω Arag de más del 20 % en comparación con sus...

TABLA 1 | El cambio porcentual entre la era preindustrial (1750) y la actualidad (2020) en comparación con el límite del 20% para cada región, mostrando ± errores en el cambio porcentual calculado al propagar las desviaciones estándar (ver métodos).

	% de cambio entre 1750 y 2020 ± error propagado				Límite ± error propagado			
	0 metros	50 metros	100 metros	200 metros	0 metros	50 metros	100 metros	200 metros
Ártico	26 ± 15,2	25±11,3	25±10.0	20 ± 9,5	20±13.0	20±10.0	20±9,4	20±8,5
Pacífico-N	22±6,4	24 ± 6,4	26 ± 7,8	24±14,1	20±6,9	20±7,3	20±9.0	20±12,9
Atlántico-N	20±6,5	20±6.8	21 ± 6,6	20±6,1	20±6,7	20±7,1	20 ± 7,2	20 ± 7,2
Pacífico-C	17±4,1	17±4,5	18 ± 5,7	21 ± 11,9	20±5,8	20±6.0	20±6.8	20±9.0
Atlántico-C	16±3,3	17 ± 3,6	18±5,3	19 ± 9,9	20±5,6	20 ± 5,7	20±6,7	20±8,7
indio	17 ± 3,2	17 ± 3,8	20±5,6	21 ± 10,3	20±5,5	20±5,8	20±7,1	20±8,8
Del sur	22±4.6	21 ± 4,7	22±5,2	20±5,6	20±6.0	20±5,9	20±6,5	20±7,4
Global	17±5.0	18±4,5	19±5,9	20 ± 10,7	20±5,3	20±5,2	20±6,1	20±7,6

En condiciones preindustriales, en términos del valor medio anual de superficie Ω Arag , aún no se ha cruzado el umbral químico de 1, es decir, el Ω Arag del año 2020 (mediana ± DE de múltiples modelos) es $1,49 \pm 0,14$ y $1,77 \pm 0,04$ para el océano Ártico y el océano Austral, respectivamente.

Por lo tanto, considerando únicamente el valor superficial promedio anual, el límite del 20% efectivamente impide que los océanos polares alcancen la subsaturación. Sin embargo, las observaciones y los modelos muestran que algunas regiones de ambos océanos polares experimentan períodos de subsaturación estacionalmente y, en algunos casos, anualmente en sus aguas superficiales en la actualidad (Cross et al., 2018; Qi et al., 2022; Terhaar et al., 2021).

El porcentaje de aguas superficiales del océano Ártico subsaturadas con respecto a Ω Arag se cuadruplicó entre las condiciones preindustriales y el año 2020 d. C. (Figura 2). El producto de los datos del modelo sugiere que aproximadamente el 5 % ± 0,2 % de las aguas superficiales del Ártico estaban subsaturadas en la época preindustrial, y este valor se mantuvo relativamente estable hasta la década de 1980, cuando comenzó a aumentar. En la década de 1990 era de aproximadamente el 7 % ± 0,2 % y en la década de 2020...

es de aproximadamente el 21 % ± 0,2 % (Figura 2). Para tener mejor en cuenta la variabilidad regional, que representa las condiciones a las que están expuestos los organismos marinos locales, un límite para el Ártico podría definirse mejor mediante la proporción de la superficie del océano subsaturada, en lugar de utilizar el valor superficial promedio absoluto.

Por ejemplo, para evitar que el 10% o menos de las aguas superficiales se saturen, se utilizará el promedio equivalente de la superficie global Ω Arag El valor se superó a finales de la década de 2000, lo que equivale a una disminución general del 14 % ± 3,3 % con respecto al valor promedio mundial de Ω Arag preindustrial . Sin embargo, definir qué proporción de subsaturación se encuentra dentro de un margen seguro para las consecuencias ecológicas (es decir, 5 %, 10 %) sigue siendo subjetivo. Siempre que sea posible, se deben incluir indicadores biológicos para ayudar a definir límites seguros, previniendo así el deterioro biológico y, en última instancia, protegiendo los ecosistemas marinos vulnerables y sus servicios.

3.1.2 | Prevención de la exposición de los sistemas coralinos tropicales a condiciones marginales

El segundo criterio para establecer el límite planetario de OA (Rockström et al. 2009), fue que las condiciones promedio globales

Sería suficiente para evitar que los sistemas coralinos de aguas cálidas se expongan a condiciones marginales (Ω Arag < 3,5). El Ω Arag superficial promedio se encuentra actualmente por debajo de 3,5 en las tres regiones de baja latitud (40°S a 40°N) que contienen la mayor abundancia y diversidad de arrecifes de coral del mundo: el Ω Arag del año 2020 (mediana ± DE multimodelo) es de $3,36 \pm 0,07$, $3,49 \pm 0,04$ y $3,45 \pm 0,05$, para el Pacífico central, el Atlántico central y el océano Índico, respectivamente. Por lo tanto, aunque la reducción del Ω Arag promedio para cada una de estas regiones no ha superado el límite del 20% en comparación con las condiciones preindustriales, la disminución del Ω Arag...

Ha alcanzado niveles que representan condiciones marginales para el crecimiento de los arrecifes de coral. Para evitar que estas regiones de baja latitud (en conjunto) caigan por debajo de 3,5, el Ω Arag promedio global no debería disminuir más del 15 % ± 9 % con respecto a las condiciones preindustriales (Tabla 2, Tablas S8 y S9). Entre 1750 y 2020, el porcentaje de área con Ω Arag < 3,5 aumentó un 30 % para la superficie oceánica global o un 43 % con respecto únicamente a las regiones de baja latitud (Figura 3). Por lo tanto, aunque una gran proporción de arrecifes de coral permanece en áreas por encima de 3,5 (Figura 3), la disponibilidad de hábitat adecuado está disminuyendo rápidamente.

3.2 | Evaluación del subsuelo oceánico como parte del límite de la OA

Para comparar con la superficie del océano, evaluamos la reducción de Ω Arag entre la época preindustrial y la actualidad (2020 d. C.) en tres capas de profundidad (50 m, 100 m y 200 m), incluidos los errores propagados, y luego calculamos la proporción de área que ha cruzado el límite del 20 % para cada capa (Figura 4, Figura S1).

Para 2020, el Ω Arag promedio global disminuyó un 17,9 % ± 4,5 %, un 19,3 % ± 5,9 % y un 19,7 % ± 10,7 % a 50 m, 100 m y 200 m, respectivamente. Considerando el valor preindustrial superior como límite de precaución, esto resulta en que el 40 % ± 9,7 % (mediana ± DE del modelo múltiple) de la superficie oceánica habrá superado el límite del 20 % para el año 2020, lo que equivale aproximadamente al mismo nivel a 50 m (44 % ± 10,8 % del área), pero aumentó al 58,3 % ± 10,7 % del área a 100 m y al 61 % ± 10,6 % del área a 200 m (Figura 4, Figura S1).

A nivel regional, si bien el mayor cambio en la superficie se ha producido en las regiones polares, el mayor cambio a 100 m y 200 m se ha producido

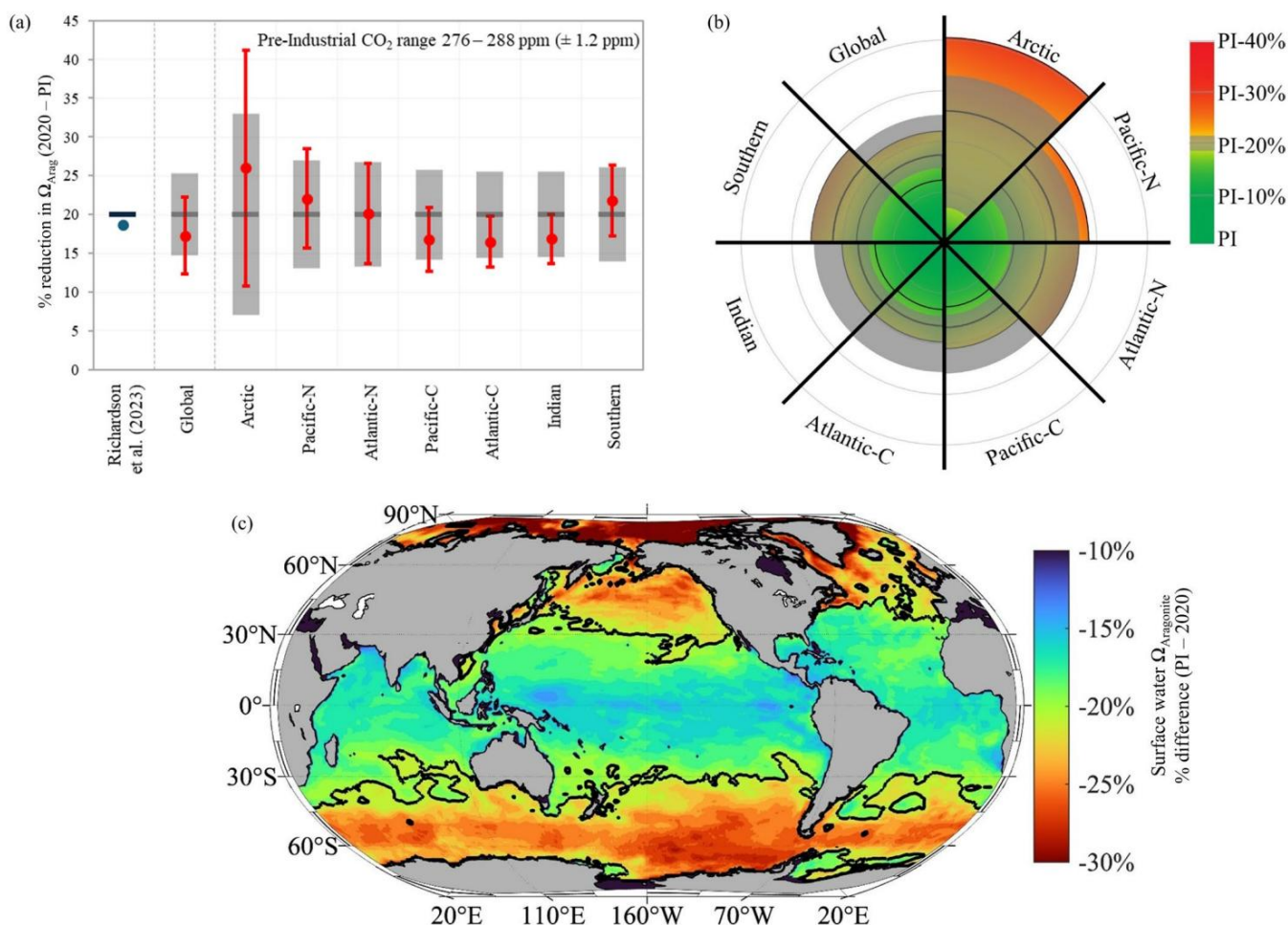


FIGURA 1 | Límite planetario de acidificación oceánica. (a) Reducción porcentual (%) entre el estado actual y el preindustrial de saturación de aragonito para la superficie del océano global y las siete regiones oceánicas, también en comparación con la evaluación del límite planetario de Richardson et al. (2023) (círculo azul y línea azul). Los círculos rojos representan la mediana del conjunto multimodelo con los errores propagados asociados para la desviación estándar del conjunto multimodelo y las incertidumbres preindustriales. El valor límite del 20% se presenta como las líneas gris oscuro con sus incertidumbres asociadas mostradas por las bandas gris claro. Las regiones se definen como: región del océano Ártico (Ártico) al norte de 65°N; océano Pacífico norte (Pacífico-N) entre 40°N y 65°N; océano Atlántico norte (Atlántico-N) entre 40°N y 65°N; océano Pacífico central (Pacífico-C) entre 40°S y 40°N; Océano Atlántico central (Atlántico-C) entre 40°S y 40°N; Océano Índico (Índico) entre 40°S y 25°N; y Océano Antártico (Austral) al sur de 40°S. (b) Evaluación regional de la acidificación oceánica en el año 2020, en relación con el límite del 20% de reducción del estado de saturación de aragonito preindustrial, como en (a), con barras grises que representan las incertidumbres del límite y colores que representan si ese límite se ha cruzado (rojo) o no (verde). (c) Mapa que muestra la diferencia porcentual en Ω_{Arag} superficial entre el estado preindustrial (1750) y el año 2020. La línea de contorno negra en el mapa representa una reducción del 20% de los valores preindustriales.

en las regiones subpolares y de baja latitud (Figura 4, Figura S1). Los océanos subterráneos albergan ecosistemas muy diversos y ricos en biodiversidad, con pocas especies viviendo únicamente en la superficie del océano. Estos importantes cambios del subsuelo indican un impacto potencial mucho mayor en los ecosistemas marinos y los servicios que brindan, incluidos los corales de aguas profundas (por ejemplo, Müller y Gruber 2024; Pérez et al. 2018), la pesca pelágica y el secuestro de carbono marino, que deben tenerse en cuenta al definir el espacio operativo seguro.

3.3 | Aplicación de indicadores biológicos

Aquí, aplicamos nuevos umbrales biológicos para los grupos de indicadores clave definidos previamente, que tienen una sensibilidad conocida al OA y son de relevancia global (Tabla 2 y Tabla S8).

3.3.1 | Superación de las condiciones marginales que sustentan las redes tróficas polares

El porcentaje del área oceánica en las regiones polares, promediado a lo largo del hábitat de profundidad de los pterópodos (0–200 m), que ha cruzado los umbrales de disolución de concha leve ($\Omega_{Arag} = 1.5$) y severa ($\Omega_{Arag} = 1.2$), ha aumentado un 61% y un 16%, respectivamente, entre la época preindustrial y la actualidad (2020 d. C.) (Tabla 2, Tablas S8 y S9). Además, un mayor porcentaje del área de los océanos polares ha superado el umbral de disolución leve de 1.5 para el año 2020 en comparación con cuando se considera el límite de OA de una reducción del 20% con respecto a las condiciones Ω_{Arag} preindustriales (80% frente a 76%, respectivamente; Tabla 2, Tablas S8 y S9). Para permanecer por encima de los umbrales de disolución leve y severa, las condiciones promedio del Ω_{Arag} (0–200 m) del océano polar no pueden disminuir más del 13% \pm 16% y el 31% \pm 12%, respectivamente, desde el

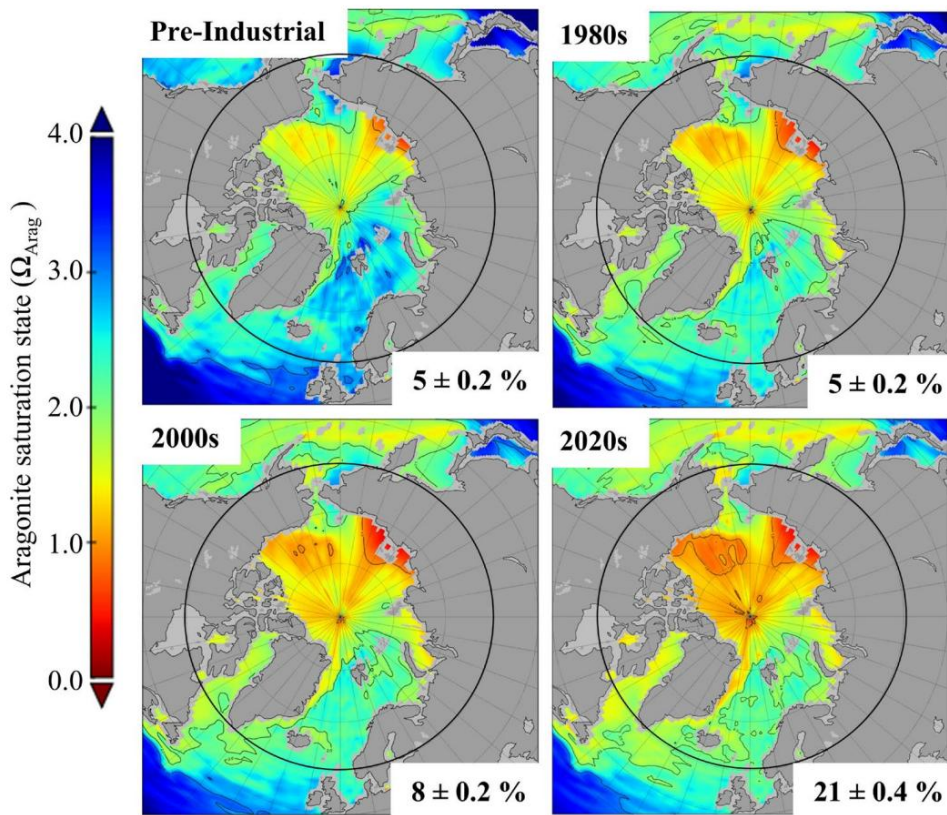


FIGURA 2 | Estado de saturación de aragonito en aguas superficiales (Ω_{Arag}) en el Océano Ártico entre 1750 y 2020. Los mapas muestran las condiciones promedio de la década respectiva (marcadas en la parte superior de cada mapa). Las cifras en la parte inferior de cada mapa indican el porcentaje (mediana multimodelo \pm error propagado mediante DE multimodelo) del área entre 60° y 90° N con $\Omega_{Arag} < 1$. Los mapas se crearon utilizando el producto de datos retrospectivos de Jiang et al. (Jiang et al., 2022).

valor preindustrial, e incluso en este nivel todavía habrá algunas áreas en las que se cruce el umbral (Tabla 2, Tablas S8 y S9).

3.3.2 | Superación de las condiciones marginales que sustentan la acuicultura y la pesca de mariscos

El umbral de condiciones marginales para los bivalvos se estableció en $\Omega_{Arag} < 1.8$. Utilizando este valor junto con su distribución a lo largo de las regiones costeras globales (establecidas a < 300 km de la costa y un rango de profundidad de 0 a 25 m), el área que ha alcanzado condiciones marginales ha aumentado un 12 % entre el año 1750 y el año 2020 (Tabla 2, Tablas S8 y S9). Un límite establecido en una reducción del 20 % con respecto a las condiciones preindustriales resulta en que el 16 % de los hábitats costeros globales son marginales para los bivalvos. Para evitar que los bivalvos alcancen condiciones marginales, las condiciones costeras promedio de Ω_{Arag} (0 a 25 m) no pueden disminuir más del 51 % \pm 14 % con respecto a los valores preindustriales.

3.4 | Detener la tendencia y mantener un espacio operativo seguro

El factor inequívoco que impulsa la acidificación de los océanos es la rápida absorción de CO_2 antropogénico por los océanos. Las proyecciones de los modelos muestran que solo siguiendo el escenario de bajas emisiones (SSP1-2.6) es posible mantener algunas partes de la superficie oceánica global dentro del límite del 20 %, y para finales de siglo, esas áreas comenzarán a expandirse.

Nuevamente (Figura S2). Esto contrasta marcadamente con los escenarios de emisiones intermedias (SSP2-4.5) y altas (SSP3-7.0), que implican que el 100% de la superficie oceánica global supere el límite del 20%. De hecho, para el año 2100, casi el 25% de la superficie oceánica global tendrá niveles de $\Omega_{Arag} > 40\%$ inferiores a los de las condiciones preindustriales en el escenario de emisiones SSP2-4.5, mientras que casi el 95% de la superficie oceánica tendrá condiciones de $\Omega_{Arag} > 40\%$ inferiores a los niveles preindustriales en el escenario SSP3-7.0 (Figura S2).

4 | Discusión

Este estudio supone un avance significativo en el trabajo de Richardson et al. (2023) al realizar un análisis más profundo y refinado del límite planetario de la OA. Aborda las limitaciones de evaluaciones previas, incorpora información científica actualizada, utiliza indicadores biológicos adicionales y considera explícitamente las incertidumbres. Esto conduce a una definición revisada, más precisa y ecológicamente sólida del límite planetario de la OA.

El principal avance radica en pasar de una evaluación basada principalmente en los cambios químicos a un enfoque más holístico que considera las incertidumbres, las variaciones regionales, los impactos del subsuelo y las consecuencias biológicas de exceder el límite.

Teniendo en cuenta las incertidumbres de los conjuntos de modelos globales, el límite planetario de la OA debe ser considerado como una estimación de la capacidad regional y las incertidumbres asociadas.

TABLA 1

Especies	Biogeografía (año)	Presencia ambiental	Superficie	Presencia PI-20%	Presencia 2000	Alimentación (2020)-	Restricción Reglas límite
Bivalvos.c	Presencia	6,4%	10,9%	15,9%	18,6%	12,2%	54%
Pteropod.b	Presencia	18,7%	57,1%	75,9%	79,5%	60,8%	48%
Pteropod.b	Presencia	0,0%	2,8%	18,7%	15,5%	15,5%	32%
Pteropod.b	Presencia	0,0%	8,6%	36,5%	42,0%	42,0%	24%
Pteropod.b	Presencia	0,0%	0,0%	0,0%	4,0%	4,0%	99%
Coral.saf	Presencia	11,2%	27,5%	66,8%	54,0%	42,8%	99%

Con el valor preindustrial, se obtiene una incertidumbre propagada de $\pm 5,3\%$ en el límite del 20 %. Mediante un análisis global y regional, demostramos que grandes áreas del océano han...
se expandió dentro, y a veces mucho más allá, de estos límites.
Certezas. Este trabajo es un primer intento de añadir incertidumbre al límite planetario de la OA. Errores adicionales en la recopilación de datos...
La información, el desarrollo de modelos y los valores preindustriales podrían generar incertidumbres aún mayores. Esto se pone de manifiesto por la variabilidad de las incertidumbres en las regiones oceánicas. Por ejemplo, el límite del océano Ártico presenta las mayores incertidumbres ($\pm 13\%$), principalmente debido a la variabilidad entre los modelos y su representación de la dinámica de la OA en la región. Se ha observado una mejora entre los modelos CMIP5 y CMIP6 en cuanto a los parámetros de OA en el Ártico (Terhaar et al., 2021), pero...

Está claro que todavía hay problemas con la escasez de datos en esa región, junto con importantes impulsores del ciclo del carbono, como los flujos de los ríos (por ejemplo, Tank et al. 2023) y la interacción del hielo marino (Qi et al. 2022; Swoboda et al. 2024), que están mal representados en estos modelos globales.

Comprender la dinámica regional es posiblemente más útil -
Más completo que el promedio mundial en términos de impacto en el funcionamiento del ecosistema marino, retroalimentación a los sistemas planetarios y los servicios ecosistémicos que proporciona. Por ejemplo, las regiones polares y subpolares son importantes para la absorción de carbono (Friedlingstein et al., 2024) y la interacción entre la acidificación de los océanos (OA) y el CO2 futuro.

La absorción es una retroalimentación planetaria importante que debe comprenderse y evaluarse (Chikamoto et al., 2023; Gehlen et al., 2011). Además, el aumento de la temperatura del agua (incluida en los cálculos del estado de saturación aquí), que no es uniforme en todo el océano global, promueve la disociación de los iones de bicarbonato, liberando iones de carbonato adicionales y contrarrestando ligeramente la tendencia decreciente del estado de saturación del agua de mar (Figura S4; Jiang et al., 2019).

Sin embargo, este cambio en el estado de saturación, impulsado por la temperatura, es relativamente menor, ya que representa solo un aumento de aproximadamente el 1 % con un aumento de 5 °C en la temperatura del agua. Además, comprender los indicadores biológicos clave que son partes fundamentales de la red trófica es relevante a nivel mundial, pero específico a nivel regional, dado que...

Las poblaciones de peces están modificando su distribución biogeográfica con el calentamiento (IPCC, 2021). De hecho, los cambios inducidos por el clima en las redes tróficas, en particular el desplazamiento hacia las regiones polares, podrían no ser sostenibles. transportado si OA provoca una reestructuración en la base de esa red alimentaria.

La evaluación de las condiciones regionales también es especialmente importante si se establece un límite según criterios específicos de cada región y cuando las regiones cambian a ritmos diferentes, como es el caso aquí.

De hecho, la evaluación regional muestra que, si bien los océanos polares aún no están subsaturados con respecto al Ω_{Arag} promedio, han cruzado el límite del 20 % y coinciden con los océanos polares.

Estudios de observación indican que existen algunas variaciones regionales y estacionales. Concepciones incluso hoy en día. La proporción de la superficie ártica subsaturada crece rápidamente, lo que provoca la superación de umbrales biológicos relevantes, lo que demuestra un grave deterioro de las especies en las condiciones actuales. Por el contrario, las regiones de baja latitud, en promedio, ya han alcanzado condiciones marginales para el crecimiento de los arrecifes de coral, con...

Se proyecta la expansión de estas áreas, pero aún no han cruzado el límite del 20%.

Las regiones costeras son naturalmente más variables que el océano abierto, con factores que interactúan de forma compleja y están poco limitados en los modelos de gestión ambiental global (MES). Por lo tanto, las incertidumbres asociadas con

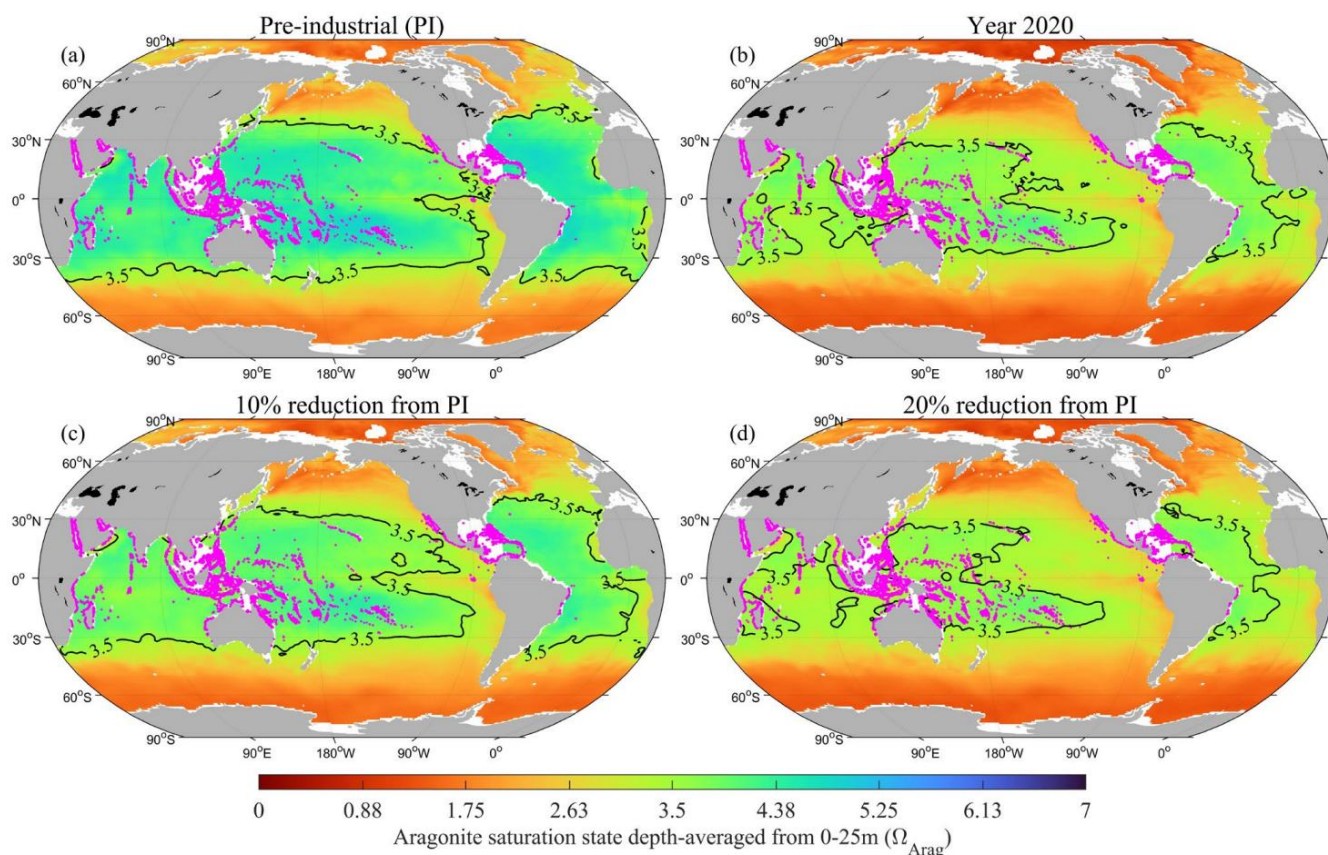


FIGURA 3 | Mapas del estado de saturación de aragonito en la superficie del océano (Ω_{Arag}), resaltando el contorno de 3,5 para mostrar las regiones que pueden considerarse condiciones marginales para los sistemas de coral, con la distribución de los arrecifes de coral superpuesta en cada mapa en puntos morados. (a) Ω_{Arag} preindustrial, (b) Ω_{Arag} año 2020, (c) Condiciones de Ω_{Arag} con una reducción del 10 % respecto de los niveles preindustriales y (d) Condiciones de Ω_{Arag} con una reducción del 20 % respecto de los niveles preindustriales.

Es probable que los cambios en las regiones costeras sean mucho mayores y se subestimen en este trabajo. Nuestro análisis de las costas globales sugiere que la señal de OA aún resulta en una reducción del hábitat adecuado para especies calcificantes de importancia económica (es decir, Feely et al. 2024). El análisis aquí no considera eventos extremos ni cambios abruptos en las condiciones, que podrían ser más perjudiciales para las poblaciones locales que los cambios crónicos a largo plazo. Se sabe que este es el caso de la temperatura, donde se han observado muertes de poblaciones como resultado de las olas de calor marinas (Smale et al. 2019). Sin embargo, el único ejemplo, hasta la fecha, de muertes de poblaciones debido a eventos periódicos de OA son las larvas de ostra del Pacífico en la costa oeste de América del Norte, donde la surgencia natural combinada con OA ha resultado en una mayor frecuencia e intensidad de eventos de OA que impactan los criaderos en la región (Barton et al. 2012, 2015). Si bien este trabajo incluye cierta variabilidad inherentemente debido a la propagación de la incertidumbre entre los datos del modelo, estos eventos añadirían aún más variabilidad y, en última instancia, podrían resultar en una superación prematura de las condiciones críticas y mayores implicaciones biológicas. El trabajo futuro debería incluir una mejor coordinación entre los estudios químicos y biológicos, así como la evaluación de datos ambientales temporales de mayor resolución para capturar adecuadamente el entorno al que están expuestos los organismos, incluyendo la frecuencia y la magnitud de las condiciones extremas.

Grandes porciones del subsuelo ya han cambiado significativamente con respecto a las condiciones preindustriales. Esto se destacó recientemente en un artículo que reconstruyó el interior del océano.

Acidificación durante la era industrial, lo que confirma que se están produciendo cambios significativos en el océano interior debido a la absorción de CO_2 antropogénico (Müller y Gruber, 2024). De hecho, además de la compresión espacial horizontal en rangos de profundidad específicos que se destaca aquí, Müller y Gruber (2024) enfatizan que la reducción del horizonte de saturación de aragonito ($\Omega_{\text{Arag}} = 1$) se ha producido en algunos lugares en más de 200 m, lo que, por lo tanto, está causando una compresión vertical en el hábitat "seguro" para muchas especies. Por ejemplo, la proporción de hábitat que ha superado las condiciones marginales en cada capa de profundidad individual para los pterópodos (umbral 1,2) es del 16,4 % para el año 2020 en la superficie, del 13,6 % a 50 m, del 23,4 % a 100 m y del 42,7 % a 200 m (resultados completos en las Tablas S10-S13). Esta información estratificada verticalmente es especialmente útil para fines comparativos de especies que ocupan distintas capas de profundidad para establecer el alcance de la compresión vertical del hábitat y determinar su sensibilidad relativa. La variabilidad regional en la formación de bancos de arena (la mayor cantidad se observa en el Océano Antártico y el Atlántico Norte, y la menor en el Pacífico Norte) resalta una vez más la complejidad de la OA en el espacio tridimensional del océano, en comparación con la superficie bidimensional. Esta presión vertical y horizontal en la química debe reconocerse al evaluar el funcionamiento biogeoquímico planetario, las retroalimentaciones del ciclo del carbono, la idoneidad del hábitat y la estabilidad de los ecosistemas.

La pérdida de la función del ecosistema o de hábitats adecuados puede provocar la fragmentación, es decir, la ruptura de la distribución continua de una especie en áreas más pequeñas y aisladas. Esta fragmentación...

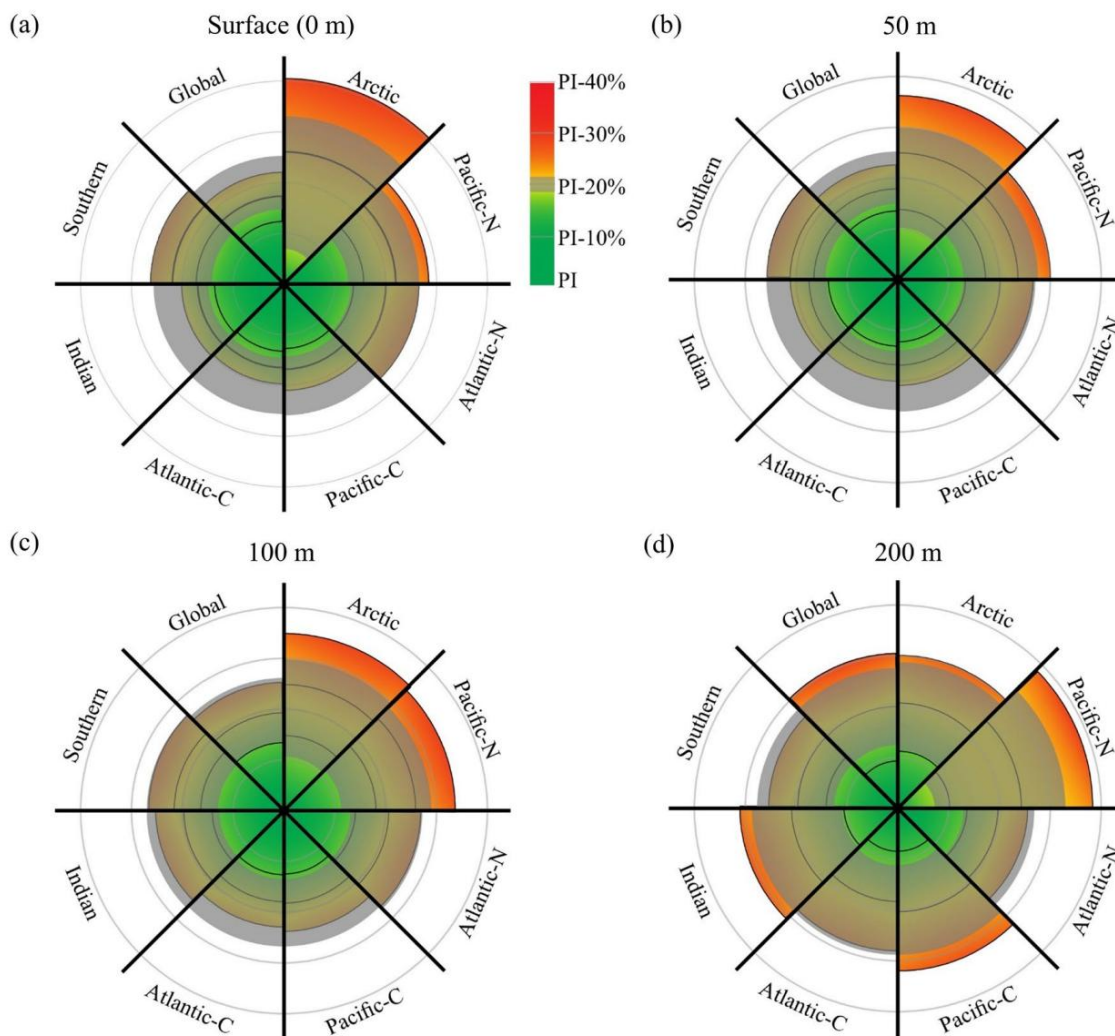


FIGURA 4 | Evaluación regional de la acidificación oceánica en el año 2020, en relación con el límite de reducción del 20 % respecto al estado de saturación de aragonito preindustrial para cada capa de profundidad. (a) superficie, 0 m, (b) 50 m, (c) 100 m y (d) 200 m. Las bandas grises representan el límite; la extensión de cada cuña representa el grado de cambio en cada región. Los datos son medianas multimodelo de Jiang et al. (2022) y Jiang (2024) e incluyen errores \pm propagados tanto en el valor de 2020 (líneas negras en cada cuña) como en el límite (banda gris). Las regiones se definen como en la Figura 1.

Reduce directamente la conectividad poblacional, ya que los individuos dentro de los hábitats fragmentados tienen menos oportunidades de interacción, apareamiento y dispersión. Esta conectividad reducida limita el flujo genético entre poblaciones, esencial para mantener la diversidad genética y el potencial de adaptación. Por lo tanto, las poblaciones aisladas con flujo genético restringido son más susceptibles a la endogamia y a un menor potencial evolutivo (Bertness y Gaines, 1993). La fragmentación también puede limitar la dispersión larvaria, reduciendo la capacidad de reproducción de las poblaciones, lo que hace que las poblaciones aisladas se vuelvan cada vez más vulnerables a la extinción local. Por lo tanto, mantener la conectividad poblacional es crucial para garantizar la supervivencia a largo plazo de las especies marinas. Una evaluación más precisa de los límites de acceso abierto, como la que se demuestra en este estudio, no solo respalda las decisiones sobre mitigación del clima, sino que también puede ayudar a diseñar estrategias de conservación (por ejemplo, Nissen et al., 2024), por ejemplo, al brindar una base científica más sólida para establecer objetivos dentro de los acuerdos de políticas, como el acuerdo sobre biodiversidad más allá de la jurisdicción nacional (BBNJ), así como el Marco mundial para la diversidad biológica de Kunming-Montreal (CDB, 2022).

Con base en nuestro nuevo análisis de incertidumbres, cambios superficiales y subsuperficiales, y el cruce a condiciones marginales para indicadores biológicos clave, proponemos que, si se utiliza un valor único como límite planetario de OA, este debería establecerse en un valor más conservador de una disminución del 10 % con respecto a las condiciones preindustriales promedio de Ω_{Arag} en la superficie global, en lugar del 20 %. Un límite establecido en el 10 % de las condiciones preindustriales permitirá: (1) Limitar el área del océano superficial del Ártico que está subsaturada a menos

(2) Sostener los hábitats polares y proteger a las especies sensibles, como los pterópodos, de la disolución de las conchas; es decir, utilizando este límite inferior, el 57 % de los 200 m superiores del hábitat de pterópodos polares estará en condiciones o por debajo de las que resultan en una disolución leve de las conchas, y solo el 3 % del espacio del hábitat estará en condiciones o por debajo de las que resultan en una disolución severa; (3) Preservar las condiciones en las regiones tropicales por encima del nivel requerido para un crecimiento adecuado de los corales: limitar la pérdida superficial de hábitat de coral adecuado al 28 % de las regiones de baja latitud (Figura 3); y (4) Sostener los bivalvos económica y ecológicamente relevantes en las regiones costeras, no solo protegiéndolos de la OA sino también aumentando su resiliencia a otros factores de estrés, incluido el calentamiento global.

y desoxigenación. El porcentaje de hábitat costero global no apto para la producción de ostras se reduce a tan solo el 10 % si se utiliza un límite del 10 %.

El límite del 10% es un objetivo más estricto y ecológicamente significativo, que refleja las conclusiones de este estudio: una reducción del 20% proporciona una protección insuficiente para muchos hábitats oceánicos cruciales más allá de las aguas superficiales. Este límite del 10% debe considerarse como el límite inferior de un rango de incertidumbre de riesgo creciente, especialmente importante ya que la acidificación de los océanos (OA) debe considerarse en combinación con otros factores de estrés y eventos extremos que pueden causar hábitats críticos.

La pérdida de agua y biodiversidad, y la reestructuración de los ecosistemas. Sin embargo, redefinir el límite de la acidificación de los océanos al 10% significa que este límite se cruzó por primera vez en la década de 1980, y que toda la superficie del océano lo había superado para la década de 2000. Prevenir un mayor aumento de la acidificación de los océanos y minimizar los riesgos para los ecosistemas oceánicos a nivel global solo puede lograrse mediante la reducción de las emisiones de CO2 y la rápida eliminación de gases de efecto invernadero atmosféricos (Lee et al., 2023).

Es importante reconocer las limitaciones de un límite de OA que solo utiliza aragonito, como se menciona en críticas previas a la evaluación del límite planetario (Biermann y Kim, 2020; Brewer, 2009; Nash et al., 2017). Ω Arag es solo un parámetro de varios que representan cómo cambia la química oceánica en relación con el OA. Por ejemplo, se ha demostrado que algunos procesos biológicos y biogeoquímicos (p. ej., producción primaria, fijación de carbono, ciclo del nitrógeno) se ven influenciados por cambios en la pCO2.

o pH (Findlay y Turley 2021). Considerar cómo estos procesos, y de manera importante sus interacciones, se relacionan con el mantenimiento de un espacio operativo seguro es una tarea compleja, especialmente dado que muchos de los resultados provienen de estudios que solo analizan la respuesta a las condiciones actuales y futuras, con poca información sobre la respuesta a los niveles preindustriales, la variabilidad natural o a través de la historia reciente. A medida que se disponga de más estudios de campo y datos de monitoreo, algunas de estas brechas podrían llenarse, y una futura evaluación del límite de OA podría ser capaz de incorporar estos aspectos, así como mejorar nuestra evaluación de la incertidumbre. De hecho, puede ser más pertinente centrarse en el nivel de CO2 que impulsa el cambio relacionado con OA en lugar de elegir un indicador químico específico de OA (Ω Arag). De hecho, como reconocen otros (p. ej., Rose et al. 2024), OA no debería ser el único proceso marino considerado en el contexto del marco de límites planetarios. Por ejemplo, el calentamiento de los océanos, incluidas las olas de calor marinas, y la desoxigenación tienen repercusiones a gran escala en la salud de los océanos y el funcionamiento del sistema planetario. También es necesario considerar las complejas interacciones entre estos factores, ya que se manifiestan en diferentes marcos temporales, con distintos grados en diferentes lugares, y pueden generar distintas respuestas en el ecosistema cuando se consideran en conjunto, a diferencia de cuando se consideran de forma aislada (Alter et al., 2024).

Para complementar la evaluación del parámetro a utilizar, se requiere un trabajo fundamental adicional para caracterizar mejor los indicadores biológicos y cuantificar sus incertidumbres, considerando, cuando sea posible, las sensibilidades específicas de cada etapa de la vida, las condiciones previas a la exposición y las estrategias de adaptación, y reconociendo las condiciones adicionales que podrían afectar los umbrales y sus duraciones. Si bien los umbrales utilizados aquí no abordan estas cuestiones específicamente, representan el nivel en el que puede producirse un daño potencial, de acuerdo con la

Marco de límites planetarios para permanecer dentro de un espacio seguro. Los desarrollos adicionales de la evaluación de la envolvente ambiental, para complementar la evaluación del umbral, podrían incluir el uso de datos de mayor resolución que mejoren la representación de las condiciones de exposición tanto en el espacio (horizontal y verticalmente) como en el tiempo (submensual). De hecho, las envolventes ambientales definidas aquí pueden subestimar el rango de Ω Arag. Una subestimación resultará en un «límite» más precautorio, pero es más representativa de los promedios a gran escala relevantes para el marco de límites planetarios.

Concluimos que este estudio proporciona una base científica más sólida y matizada para el marco de límites planetarios de la OA, aunque se deben considerar desarrollos adicionales, como se describió anteriormente. Este marco se está utilizando en las decisiones políticas relacionadas con la OA, que proporcionan la base científica para la colaboración y la acción nacionales e internacionales, incluida la priorización informada de los esfuerzos de conservación marina. Las regiones y especies más vulnerables a la OA pueden ser el objetivo de medidas de conservación específicas. Los impactos del subsuelo, en particular, requieren un cambio de enfoque para proteger los hábitats mesopelágicos y de aguas profundas y las especies que dependen de ellos. La incorporación de la incertidumbre en el estudio resalta la necesidad de estrategias de gestión adaptativas para abordar la OA, cuyos beneficios potenciales son una mejor gestión de los recursos y una mayor resiliencia.

Contribuciones del autor

Helen S. Findlay: conceptualización, curación de datos, análisis formal, obtención de financiación, investigación, metodología, administración del proyecto, visualización, redacción (borrador original, redacción, revisión y edición). Richard A. Feely: conceptualización, obtención de financiación, validación, redacción, revisión y edición. Li-Qing Jiang: curación de datos, análisis formal, obtención de financiación, metodología, visualización, redacción, revisión y edición. Greg Pelletier: curación de datos, análisis formal, metodología, visualización, redacción, revisión y edición. Nina Bednaršek: curación de datos, análisis formal, metodología, redacción, revisión y edición.

Expresiones de gratitud

Agradecemos a Stephen Widdicombe y Tim Smyth del Laboratorio Marino de Plymouth por sus comentarios iniciales sobre un borrador preliminar, así como a los revisores anónimos por sus comentarios. El HSF recibió financiación de la subvención NE/X006271/1 del Consejo de Investigación del Medio Ambiente Natural y de la subvención AO/1 de la Agencia Espacial Europea para la Salud de los Océanos y la Acidificación de los Océanos. 10757/21/I-DT. NB recibió financiación de la subvención NA210AR4310251 para factores de estrés múltiples de la NOAA y de la subvención N1-0359 de la Agencia de Investigación de Eslovenia. RAF reconoce la financiación de los Programas Global Ocean Monitoring and Observing y Ocean Acidification Programs de la NOAA (Número de referencia del fondo GOMO 100018302 y OAP NRDD 20848, y número de adjudicación NA210AR4310251) a través del Instituto Cooperativo para Estudios del Clima, Océanos y Ecosistemas (CICOES) según el Acuerdo Cooperativo NA20OAR4320271 de la NOAA. L.-QJ recibió financiación del Programa de Acidificación de los Océanos de la NOAA (OAP, <https://ror.org/02bfm4816>) de los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI) de la NOAA a través de una subvención del Instituto Cooperativo para Estudios del Sistema Terrestre por Satélite (CISESS) de la NOAA (NA19NES4320002) en el Centro Interdisciplinario de Ciencias del Sistema Terrestre (ESSIC), Universidad de Maryland, College Park, Maryland.

Conflictos de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles abiertamente en figshare en <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28861832>. Los indicadores de acidificación de los océanos se obtuvieron de los Centros Nacionales de la NOAA para Información ambiental en <https://doi.org/10.25921/9ker-bc48> y en <https://doi.org/10.25921/vdnc-q403>. Los datos de OceanSODA-ETHZv1.2023 se obtuvieron de los Centros Nacionales para el Medio Ambiente de la NOAA.

Información en <https://doi.org/10.25921/m5wx-ja34>. Los datos de ocurrencia se obtuvieron del mapeador del Servicio de Información sobre Biodiversidad Oceánica en www.obis.org. Los datos de ocurrencia de arrecifes de coral de aguas cálidas se obtuvieron de UNEP-WCMC, WorldFish Centre, WRI, TNC en <https://doi.org/10.34892/t2wk-5t34>.

Referencias

Akiha, F., G. Hashida, R. Makabe, H. Hattori y H. Sasaki. 2017.

"Distribución de la abundancia y biomasa de pterópodos con concha en aguas superficiales del sector Índico del océano Antártico a mediados del verano". *Polar Science* 12: 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2017.02.003>.

Alter, K., J. Jacquemont, J. Claudet, et al. 2024. "Impactos ocultos del calentamiento y la acidificación de los océanos en las respuestas biológicas de los animales marinos revelados mediante metaanálisis". *Nature Communications* 15, núm. 1: 2885. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47064-3>.

Anglada-Ortiz, G., K. Zamelczyk, J. Meilland, et al. 2021. "Contribuciones de foraminíferos y pterópodos planctónicos a la dinámica del carbono en el océano Ártico (margen norte de Svalbard)". *Frontiers in Marine Science* 8: 661158. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.661158>.

Barton, A., B. Hales, GG Waldbusser, C. Langdon y RA Feelyd.

2012. "La ostra del Pacífico, *Crassostrea gigas*, muestra una correlación negativa con los niveles naturalmente elevados de dióxido de carbono: implicaciones para los efectos de la acidificación oceánica a corto plazo". *Limnología y Oceanografía* 57, n.º 3: 698–710. <https://doi.org/10.4319/lo.2012.57.3.0698>.

Barton, A., GG Waldbusser, RA Feely, et al. 2015. "Impactos de la acidificación costera en la industria de mariscos del Pacífico Noroeste y estrategias de adaptación implementadas en respuesta". *Oceanografía* 28, n.º 2: 146–159. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2015.38>.

Bednaršek, N., R. Feely, G. Pelletier y F. Desmet. 2023. "Síntesis global del estado y las tendencias de los impactos de la acidificación oceánica en los pterópodos con concha". *Oceanografía* 36: 130–137. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.210>.

Bednaršek, N., RA Feely, MW Beck, et al. 2020. "Disolución del exoesqueleto con daño a los mecanorreceptores en larvas de cangrejo Dungeness en relación con la severidad de los gradientes verticales de acidificación oceánica actuales". *Science of the Total Environment* 716: 136610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136610>.

Bednaršek, N., RA Feely, EL Howes, et al. 2019. "Revisión sistemática y metaanálisis para la síntesis de los umbrales de los impactos de la acidificación oceánica en los pterópodos calcificantes y sus interacciones con el calentamiento". *Frontiers in Marine Science* 6: 227. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00227>.

Bednaršek, N., RA Feely, JCP Reum, et al. 2014. "La disolución de las conchas de *Limacina helicina* como indicador de la disminución de la idoneidad del hábitat debido a la acidificación de los océanos en el ecosistema de la corriente de California". *Actas de la Royal Society B: Biological Sciences* 281, no. 1785: 20140123. <https://doi.org/10.1098/rspb.2014.0123>.

Bednaršek, N., J. Možina, M. Vogt, C. O'Brien y G. A. Tarling. 2012a. "La distribución global de los pterópodos y su contribución a la biomasa de carbonato y carbono en el océano moderno". *Earth System Science Data* 4, n.º 1: 167–186. <https://doi.org/10.5194/essd-4-167-2012>.

Bednaršek, N., JA Newton, MW Beck, et al. 2021. "Efectos biológicos graves bajo la acidificación estuarina actual en el mar de Salish, estacionalmente variable". *Science of the Total Environment* 765: 142689. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142689>.

Bednaršek, N., GA Tarling, DCE Bakker, et al. 2012b. "Disolución extensa de pterópodos vivos en el océano Antártico". *Nature Geoscience* 5, no. 12: 881–885. <https://doi.org/10.1038/ngeo1635>.

Bernard, KS, y PW Froneman. 2009. "El pterópodo euthecosoma subantártico, *Limacina retroversa*: Patrones de distribución y función trófica". Investigación en aguas profundas, parte I: Artículos de investigación oceanográfica. 56, no. 4: 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2008.11.007>.

Bertness, MD, y SD Gaines. 1993. "Dispersión larvaria y adaptación local en percebes belloteros". *Evolution* 47, n.º 1: 316–320. <https://doi.org/10.2307/2410140>.

Biermann, F. y RE Kim. 2020. "Los límites del marco de límites planetarios: una evaluación crítica de los enfoques para definir un 'espacio operativo seguro' para la humanidad". *Revista Anual de Medio Ambiente y Recursos* 45, n.º 1: 497–521. <https://doi.org/10.1146/annurev-envir-el-012320-080337>.

Boyd, P. W., S. Collins, S. Dupont, et al. 2018. "Estrategias experimentales para evaluar las ramificaciones biológicas de múltiples impulsores del cambio oceánico global: una revisión". *Biología del cambio global* 24, n.º 6: 2239–2261. <https://doi.org/10.1111/gcb.14102>.

Brewer, PG 2009. "Considerar todas las consecuencias". *Nature Climate Change* 3: 117–118. <https://doi.org/10.1038/climate.2009.98>.

Caldiera, K., y M. Wickett. 2003. "Carbono antropogénico y pH del océano". *Nature* 425: 365. <https://doi.org/10.1038/425365a>.

CDB. 2022. "Decisión adoptada por la Conferencia de las Partes en el Convenio sobre la Diversidad Biológica 15/5. Marco de seguimiento del Marco Mundial para la Diversidad Biológica de Kunming-Montreal". <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-05-en.pdf>.

Chave, KE, y E. Suess. 1970. "Saturación de carbonato de calcio en agua de mar: efectos de la materia orgánica disuelta". *Limnología y Oceanografía* 15, n.º 4: 633–637. <https://doi.org/10.4319/lo.1970.15.4.0633>.

Chikamoto, MO, P. DiNezio y N. Lovenduski. 2023. "Desaceleración a largo plazo de la absorción de carbono oceánico por la dinámica de la alcalinidad". *Geophysical Research Letters* 50, n.º 4: e2022GL101954. <https://doi.org/10.1029/2022GL101954>.

Cross, JN, JT Mathis, RS Pickart y NR Bates. 2018. "Formación y transporte de agua corrosiva en la región del Pacífico Ártico". Investigación en aguas profundas, Parte II: Estudios temáticos en oceanografía 152: 67–81. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.05.020>.

Doney, SC, DS Busch, SR Cooley y KJ Kroeker. 2020. "Los impactos de la acidificación de los océanos en los ecosistemas marinos y las comunidades humanas dependientes". *Revista Anual de Medio Ambiente y Recursos* 45: 83–112. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083019>.

Etheridge, DM, LP Steele, RL Langenfelds, RJ Francey, J.-M. Barnola y VI Morgan. 1996. "Cambios naturales y antropogénicos en el CO₂ atmosférico durante los últimos 1000 años a partir del aire en el hielo y el firm antárticos". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101, n.º D2: 4115–4128. <https://doi.org/10.1029/95JD03410>.

Fassbender, AJ, BR Carter, JD Sharp, Y. Huang, MC Arroyo y H.

Frenzel. 2023. "Señales subsuperficiales amplificadas de acidificación oceánica".

Ciclos biogeoquímicos globales 37, no. 12: e2023GB007843. <https://doi.org/10.1029/2023GB007843>.

Feely, R., L.-Q. Jiang, R. Wanninkhof, et al. 2023. "Acidificación de la superficie global del océano: Lo que hemos aprendido de las observaciones".

Oceanografía 36: 120–129. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.222>.

Feely, RA, SR Alin, B. Carter, et al. 2016. "Impactos químicos y biológicos de la acidificación de los océanos a lo largo de la costa oeste de Norteamérica". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 183: 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.043>.

Feely, RA, BR Carter, SR Alin, D. Greeley y N. Bednaršek.

2024. "Los efectos combinados de la acidificación y la respiración de los océanos sobre la idoneidad del hábitat para los calcificadores marinos a lo largo de la costa oeste de

América del Norte". Revista de investigación geofísica: Océanos 129, no. 4: e2023JC019892.

Feely, RA, CL Sabine, JM Hernandez-Ayon, D. Ianson y B.

Hales. 2008. "Evidencia de afloramiento de agua corrosiva 'acidificada' en la plataforma continental". Science 320, n.º 5882: 1490–1492. <https://doi.org/10.1126/science.1155676>.

Feely, RA, CL Sabine, K. Lee, et al. 2004. "Impacto del CO₂ antropogénico en el sistema CaCO₃ en los océanos". Science 305, no. 5682: 362–366.

Filipa Mesquita, A., F. José Mendes Gonçalves y A. Marta Mendes Gonçalves. 2024. "Roles ecológicos de los bivalvos marinos e interacciones entre los seres humanos y el medio ambiente para lograr ecosistemas acuáticos sostenibles". En Ciencias Ambientales, editado por A. Marta, vol. 15. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.111386>.

Findlay, HS y C. Turley. 2021. "Acidificación de los océanos y cambio climático". En Cambio climático, 251–279. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821575-3.00013-x>.

Findlay, HS, HL Wood, MA Kendall, S. Widdicombe, JI Spicer y RJ Twitchett. 2011. "Comparación del impacto de altos niveles de CO₂ en las estructuras de carbonato de calcio en diferentes organismos marinos". Marine Biology Research 7, n.º 6: 565–575. <https://doi.org/10.1080/17451000.2010.547200>.

Friedlingstein, P., M. O'Sullivan, MW Jones, et al. 2024. "Presupuesto global de carbono 2024". <https://doi.org/10.5194/essd-2024-519>.

Gabaev, DD 2015. "Variaciones en la distribución vertical de las crías de dos especies comerciales de bivalvos en función de algunos factores. Estadounidense". Revista de Ciencias Marinas 3, no. 1: 22–35. <https://doi.org/10.12691/marino-3-1-3>.

Gangstø, R., M. Gehlen, B. Schneider, L. Bopp, O. Aumont y F. Joos. 2008. "Modelación del ciclo del aragonito marino: Cambios bajo el aumento del dióxido de carbono y su papel en el CaCO₃ de aguas someras" Disolución". Biogeosciences 5, no. 4: 1057–1072. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1057-2008>.

Gaylord, B., TM Hill, E. Sanford, et al. 2011. "Impactos funcionales de la acidificación de los océanos en una especie fundamental ecológicamente crítica". Revista de Biología Experimental 214, n.º 15: 2586–2594. <https://doi.org/10.1242/o.055939>.

Gehlen, M., N. Gruber, R. Gangstø, L. Bopp y A. Oschlies. 2011. "Consecuencias biogeoquímicas de la acidificación oceánica y su retroalimentación al sistema terrestre". En Acidificación oceánica. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199591091.003.0017>.

Gobler, CJ y SC Talmage. 2014. "Respuesta fisiológica y resiliencia de las ostras orientales (Crassostrea virginica) en etapas tempranas de vida a la acidificación oceánica pasada, presente y futura". Fisiología de la conservación 2, no. 1: cou004. <https://doi.org/10.1093/conphys/cou004>.

Gregor, L. y N. Gruber. 2020. OceanSODA-ETHZ: Un conjunto global de datos en cuadrícula del sistema de carbonatos oceánicos superficiales para estudios estacionales a decenales de la acidificación oceánica (v2023) (Número de acceso NCEI 0220059). Centros Nacionales de Información Ambiental de la NOAA. <https://doi.org/10.25921/m5wx-ja34>.

Gregor, L. y N. Gruber. 2021. "OceanSODA-ETHZ: Un conjunto global de datos en cuadrícula del sistema de carbonatos oceánicos superficiales para estudios estacionales a decenales de la acidificación oceánica". Earth System Science Data 13, n.º 2: 777–808. <https://doi.org/10.5194/essd-13-777-2021>.

Gruber, N., P. W. Boyd, T. L. Frölicher y M. Vogt. 2021. "Extremos biogeoquímicos y eventos compuestos en el océano". Nature 600, n.º 7889: 395–407. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03981-7>.

Guinotte, JM, RW Buddemeier y JA Kleypas. 2003. "Futura marginalidad del hábitat de los arrecifes de coral: efectos temporales y espaciales del cambio climático en la cuenca del Pacífico". Coral Reefs 22, n.º 4: 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.1016.0rg/10.1007/s00338-003-0331-4>.

Harris, PT, L. Westerveld, Q. Zhao y MJ Costello. 2023. "Línea de nieve ascendente: acidificación de los océanos y la sumersión del fondo marino"

Características geomórficas bajo una profundidad de compensación de carbonato ascendente". Marine Geology 463: 107121. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107121>.

Hauri, C., R. Pagès, K. Hedstrom, et al. 2024. "Más que olas de calor marinas: Un nuevo régimen de eventos extremos de calor, acidez y compuestos con bajo contenido de oxígeno en el Golfo de Alaska". AGU Advances 5, n.º 1: e2023AV001039. <https://doi.org/10.1029/2023AV001039>.

Hettinger, A., E. Sanford, TM Hill, et al. 2012. "Efectos persistentes de arrastre de la exposición planctónica a la acidificación del océano en la ostra Olympia". Ecology 93: 2758–2768. <https://doi.org/10.1890/12-0567.1>.

Hobday, AJ, LV Alexander, SE Perkins, et al. 2016. "Un enfoque jerárquico para definir las olas de calor marinas". Avances en Oceanografía 141: 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>.

Hunt, BPV, EA Pakhomov, GW Hosie, V. Siegel, P. Ward y K. Bernard. 2008. "Pterópodos en los ecosistemas del océano Austral". Progress in Oceanography 78, n.º 3: 193–221. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.06.001>.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). 2023. "Cambio climático 2021: Bases físicas: Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático". En Estado cambiante del sistema climático, pp. 287–422. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>.

COI-UNESCO. 2022. "Múltiples factores de estrés oceánico: Resumen científico para responsables de políticas". En la Serie de Información de la COI 1404, 20. UNESCO. <https://doi.org/10.25607/OBP-1724>.

IPCC. 2021. "Resumen para responsables de políticas". En Cambio climático 2021: Bases físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, editado por V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al. Cambridge University Press.

Jiang, L., BR Carter, RA Feely, SK Lauvset y A. Olsen. 2019. "Ph superficial del océano y capacidad de amortiguación: pasado, presente y futuro". Informes científicos 9: 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55039-4>.

Jiang, L., J. Dunne, BR Carter, et al. 2023. "Indicadores globales de acidificación superficial de los océanos de 1750 a 2100". Revista de avances en el modelado de sistemas terrestres 15, n.º 3: e2022MS003563. <https://doi.org/10.1029/2022MS003563>.

Jiang, LQ 2024. Indicadores globales de acidificación subsuperficial oceánica a 50, 100 y 200 metros de profundidad, del 01/01/1750 al 31/12/2100 (Número de acceso NCEI 0287573). Centros Nacionales de Información Ambiental de la NOAA. <https://doi.org/10.25921/vdnc-q403>.

Jiang, LQ, JP Dunne, B. Carter, et al. 2022. Indicadores globales de acidificación superficial del océano de 1750 a 2100 (NCEI Accession 0259391). [Conjunto de datos]. Centros Nacionales de Información Ambiental de la NOAA. <https://doi.org/10.25921/9ker-bc48>.

Jiang, LQ, RA Feely, BR Carter, DJ Greeley, DK Gledhill y K. M. Arzayus. 2015. "Distribución climatológica del estado de saturación de aragonito en los océanos globales". Ciclos Biogeoquímicos Globales 29, n.º 10: 1656–1673. <https://doi.org/10.1002/2015GB005198>.

Kleypas, JA, JW Mcmanus y LAB Meñez. 1999. "Límites ambientales al desarrollo de los arrecifes de coral: ¿Dónde trazamos la línea?" Zoólogo Americano 39, n.º 1: 146–159. <https://doi.org/10.1093/icb/39.1.146>.

Knights, A., T. Crowe y G. Burnell. 2006. "Mecanismos de transporte larval: la distribución vertical de larvas de bivalvos varía con las condiciones de marea". Marine Ecology Progress Series 326: 167–174. <https://doi.org/10.1377/j.1016.0rg/10.3354/meps326167>.

Kobayashi, HA 1974. "Ciclo de crecimiento y distribución vertical relacionada del pterópodo tecosomatoso Spiratella (?Limacina?) helicina en el océano Ártico central". Marine Biology 26, no. 4: 295–301. <https://doi.org/10.1007/BF00391513>.

- Lauvset, SK, RM Key, A. Olsen, et al. 2016. "Una nueva climatología mapeada del océano interior global: GLODAP 1°× 1° Versión 2". *Earth System Science Data* 8: 325–340. <https://doi.org/10.5194/essd-8-325-2016>.
- Lee, H., K. Calvin, D. Dasgupta, et al. 2023. IPCC, 2023: Cambio climático 2023: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de Redacción Principal], editado por H. Lee y J. Romero. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- León, P., N. Bednaršek, P. Walsham, et al. 2020. "Relación entre la integridad de la concha de gasterópodos pelágicos y los parámetros químicos de carbonatos en un sitio de monitoreo del Observatorio Costero Escocés". *ICES Journal of Marine Science* 77, n.º 1: 436–450. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz178>.
- Leung, JYS, BD Russell y SD Connell. 2020. "Vinculación del presupuesto energético con la adaptación fisiológica: cómo un gasterópodo calcificado se ajusta o sucumbe a la acidificación y el calentamiento de los océanos". *Science of the Total Environment* 715: 136939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136939>.
- Ma, D., L. Gregor y N. Gruber. 2023. "Cuatro décadas de tendencias e impulsores de la acidificación superficial global de los océanos". *Ciclos Biogeoquímicos Globales* 37, n.º 7: e2023GB007765. <https://doi.org/10.1029/2023GB007765>.
- MacFarling Meure, C., D. Etheridge, C. Trudinger, et al. 2006. "Registros de núcleos de hielo de CO₂, CH₄ y N₂O de Law Dome extendidos hasta 2000 años antes del presente". *Geophysical Research Letters* 33, n.º 14: 2006GL026152. <https://doi.org/10.1029/2006GL026152>.
- Manno, C., V. Tirelli, A. Accornero y S. Fonda Umani. 2010. "Importancia de la contribución de los pellets fecales de *Limacina helicina* a la bomba de carbono en la bahía de Terra Nova (Antártida)". *Journal of Plankton Research* 32, n.º 2: 145–152. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbp108>.
- Manzello, DP 2010. "Crecimiento de corales con estrés térmico y acidificación oceánica: Lecciones del Pacífico tropical oriental". *Arrecifes de coral* 29, no. 3: 749–758. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0623-4>.
- Mastrandrea, MD, CB Field, TF Stocker, et al. 2010. "Nota de orientación para los autores principales del Quinto Informe de Evaluación del IPCC sobre el Tratamiento Consistente de las Incertidumbres, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático". <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainity-nota-de-orientacion.pdf>.
- Mucci, A. 1983. "La solubilidad de calcita y aragonito en agua de mar a diversas salinidades, temperaturas y presión total de una atmósfera". *Revista estadounidense de ciencias* 283: 780–799.
- Müller, JD, y N. Gruber. 2024. "Progresión de la acidificación del interior del océano durante la era industrial". *Science Advances* 10, n.º 48: eado3103. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado3103>.
- Nash, KL, C. Cvitanovic, EA Fulton, et al. 2017. "Límites planetarios para un planeta azul". *Nature Ecology & Evolution* 1, n.º 11: 1625–1634. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0319-z>.
- Nissen, C., NS Lovenduski, CM Brooks, M. Hoppema, R. Timmermann y J. Hauck. 2024. "Acidificación oceánica severa del siglo XXI en áreas marinas protegidas antárticas". *Nature Comunicaciones* 15, núm. 1: 259. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44438-x>.
- OBIS. 2023a. Registros de distribución de *Limacina helicina* (Phipps, 1774). Disponible: Sistema de Información sobre Biodiversidad Oceánica. [Conjunto de datos]. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. www.obis.org.
- OBIS. 2023b. Registros de distribución de *Magallana gigas* (Thunberg, 1793). Disponible: Sistema de Información sobre Biodiversidad Oceánica. [Conjunto de datos]. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. www.obis.org.
- OBIS. 2023c. Registros de distribución de *Mytilus californianicus* (Conrad, 1837). Disponible: Sistema de Información sobre Biodiversidad Oceánica. [Conjunto de datos]. Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO. www.obis.org.
- Orr, JC, VJ Fabry, O. Aumont, et al. 2005. "Acidificación oceánica antropogénica durante el siglo XXI y su impacto en los organismos calcificantes". *Nature* 437, n.º 7059: 681–686. <https://doi.org/10.1038/nature04095>.
- Pérez, FF, M. Fontela, MI García-Ibáñez, et al. 2018. "La circulación meridional de retorno conlleva una rápida acidificación al océano Atlántico profundo". *Nature* 554, n.º 7693: 515–518. <https://doi.org/10.1038/nature25493>.
- Pörtner, H.-O., DC Roberts, V. Masson-Delmotte, et al. 2019. Informe especial del IPCC sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante. Vol. 1, 1–755. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático del IPCC: Ginebra, Suiza.
- Pozzi, F., T. Di Matteo y T. Aste. 2012. "Correlaciones ponderadas de suavizado exponencial". *European Physical Journal B* 85, n.º 6: 175. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-20697-x>.
- Qi, D., Y. Wu, L. Chen, et al. 2022. "Rápida acidificación de las aguas del mar de Chukchi en el Ártico impulsada por el forzamiento antropogénico y el reciclaje biológico del carbono". *Geophysical Research Letters* 49, n.º 4: e2021GL097246. <https://doi.org/10.1029/2021GL097246>.
- Raven, J., K. Caldeira, H. Elderfield, et al. 2005. Acidificación de los océanos debido al aumento del dióxido de carbono atmosférico, 68. Royal Society.
- Ready, J., K. Kaschner, AB South, et al. 2010. "Predicción de la distribución de organismos marinos a escala global". *Ecological Modelling* 221, n.º 3: 467–478. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.10.025>.
- Richardson, K., W. Steffen, W. Lucht, et al. 2023. "La Tierra más allá de seis de nueve límites planetarios". *Science Advances* 9, n.º 37: eadh2458. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, et al. 2009. "Límites planetarios: Explorando el espacio operativo seguro para la humanidad". *Ecología y sociedad* 14, no. 2: 32.
- Rose, KC, EM Ferrer, SR Carpenter, et al. 2024. "La desoxigenación acuática como límite planetario y regulador clave de la estabilidad del sistema terrestre". *Nature Ecology & Evolution* 8, n.º 8: 1400–1406. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02448-y>.
- Smale, DA, T. Wernberg, EC Oliver, et al. 2019. "Las olas de calor marinas amenazan la biodiversidad global y la provisión de servicios ecosistémicos". *Naturaleza Cambio Climático* 9, no. 4: 306–312.
- Spalding, MD, y BE Brown. 2015. "Arrecifes de coral de aguas cálidas y cambio climático". *Science* 350, n.º 6262: 769–771. <https://doi.org/10.1126/ciencia.aad0349>.
- Steffen, W., K. Richardson, J. Rockström, et al. 2015. "Límites planetarios: Guiando el desarrollo humano en un planeta cambiante". *Science* 347, n.º 6223: 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.
- Swoboda, S., T. Krumpfen, E.-M. Nöthig, et al. 2024. "La liberación de material de lastre durante el derretimiento del hielo marino aumenta la exportación de carbono en el océano Ártico". *PNAS Nexus* 3, n.º 4: pgae081. <https://doi.org/10.1093/pnasexus/pgae081>.
- Tank, SE, JW McClelland, RGM Spencer, et al. 2023. "Tendencias recientes en la química de los principales ríos del norte indican un cambio generalizado en el Ártico". *Nature Geoscience* 16, n.º 9: 789–796. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01247-7>.
- Terhaar, J., O. Torres, T. Bourgeois y L. Kwiatkowski. 2021. "Acidificación del Océano Ártico durante el siglo XXI, coimpulsada por el aumento del carbono antropogénico y la renovación del conjunto de modelos CMIP6". *Biogeosciences* 18, n.º 6: 2221–2240. <https://doi.org/10.5194/bg-18-2221-2021>.

PNUMA-WCMC, Centro WorldFish, WRI, TNC. 2021. Distribución global de los arrecifes de coral de aguas cálidas, compilada a partir de diversas fuentes, incluido el Proyecto de Mapeo de Arrecifes de Coral del Milenio. Versión 4.1. Incluye contribuciones de IMaRS-USF e IRD (2005), IMaRS-USF (2005) y Spalding et al. (2001). Cambridge (Reino Unido): Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación de ONU Medio Ambiente. <https://doi.org/10.34892/12wk-5134>.

Vargas, CA, LA Cuevas, BR Broitman, et al. 2022. "El pCO₂ ambiental superior impulsa la sensibilidad a la acidificación de los océanos en invertebrados marinos". *Nature Climate Change* 12: 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.1016.org/10.1038/s41558-021-01269-2>.

Waldbusser, GG, B. Hales, CJ Langdon, et al. 2015. "Sensibilidad del estado de saturación de larvas de bivalvos marinos a la acidificación de los océanos". *Nature Climate Change* 5, n.º 3: 273–280. <https://doi.org/10.1038/nclimate2479>.

Ward, M., AK Spalding, A. Levine y EA Wolters. 2022. "Cultivadores de mariscos de California: Percepciones de las condiciones cambiantes del océano y estrategias para la capacidad de adaptación". *Ocean and Coastal Management* 225: 106155. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106155>.

Weinstock, JB, SL Morello, LM Conlon, H. Xue y PO Yund. 2018. "Cambios de marea en la distribución vertical de larvas de bivalvos: Advección vertical vs. comportamiento activo". *Limnología y Oceanografía* 63, núm. 6: 2681–2694. <https://doi.org/10.1002/lno.10968>.

Zamelczyk, K., A. Fransson, M. Chierici, et al. 2021. "Distribución y abundancia de foraminíferos planctónicos y pterópodos con concha durante la noche polar en el norte del mar de Barents, cubierto de hielo marino". *Frontiers in Marine Science* 8: 644094. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.644094>.

Información complementaria

Puede encontrar información de respaldo adicional en línea en la sección Información de respaldo.