



Acidificación de los Océanos

Efectos en los Organismos
Calcificadores Antárticos

Yolanda Espinosa Parrilla

Monografía Modulo II

Diplomado en Asuntos Antárticos

Universidad de Magallanes

01/11/2017

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Resumen..... | 1 |
| Palabras Clave | 1 |
| <i>Summary</i> | 2 |
| Introducción..... | 3 |
| Objetivos..... | 5 |
| Metodología..... | 6 |
| Desarrollo | 7 |
| Capítulo 1. Efectos de la acidificación oceánica en organismos calcificadores..... | 7 |
| Capítulo 2. Efectos de la acidificación oceánica en aguas del Océano Antártico | 10 |
| Capítulo 3. Acciones futuras para entender y/o revertir la acidificación oceánica..... | 11 |
| Conclusiones | 14 |
| Referencias Bibliográficas | 15 |
| Figura 1..... | 19 |
| Figura 2..... | 20 |
| Figura 3..... | 21 |
| Figura 4..... | 22 |
| Figura 5..... | 23 |
| Tabla 1..... | 24 |
| Tabla 2..... | 25 |

Acidificación de los Océanos:

Efectos en los Organismos Calcificadores Antárticos

Resumen

A escala global, el exceso de CO_2 atmosférico es absorbido por las aguas oceánicas provocando cambios químicos como la disminución del pH, fenómeno conocido como acidificación oceánica. Los organismos calcificadores que habitan las aguas más frías del planeta son especialmente vulnerables a los efectos de la acidificación oceánica, un proceso que está reduciendo la capacidad de muchos organismos marinos de calcificar y formar los esqueletos de carbonato cálcico (CaCO_3) que utilizan como estructura de apoyo y protección. En estas especies, la capacidad de calcificar depende de las concentraciones de CaCO_3 disuelto en el agua, así como de la temperatura y la presión marina. En particular, las aguas frías del Océano Antártico presentan mayores concentraciones de CO_2 y menores de CaCO_3 , y ello reduce la disponibilidad del carbonato necesario para el proceso de calcificación. La presente monografía revisa los trabajos realizados en relación a los efectos de la acidificación oceánica sobre diversos organismos calcificadores marinos, haciendo énfasis en los estudios realizados en el Océano Antártico, así como las posibles acciones futuras que ayuden a entender y/o revertir la situación.

Palabras Clave

Océano Antártico, Acidificación oceánica, organismos calcificadores, CO_2 , CaCO_3

Summary

The Oceans have taken about one third of anthropogenic (human-made) CO₂ emissions, which changes the seawater chemistry and results in a decrease in pH, a phenomenon known as ocean acidification. Marine calcifying organisms that inhabit the coldest waters of the planet are especially vulnerable to the effects of ocean acidification, a process that reduces the capacity of many marine organisms to calcify and form the skeletons of calcium carbonate (CaCO₃) that they use as a structure support and protection against predators. In these species, the ability to calcify depends on the concentrations of CaCO₃ dissolved in the water, as well as the temperature and sea pressure. In particular, the cold waters of the Antarctic Ocean present higher concentrations of CO₂ and less of CaCO₃, which reduces the availability of the carbonate necessary for the calcification process. This monograph reviews the work related to the effects of ocean acidification on various marine calcifying organisms, focusing in the Antarctic Ocean, as well as possible future actions to understand and/or reverse the situation.

Introducción

Desde el inicio de la revolución industrial, a mediados del siglo XVIII, la liberación de dióxido de carbono (CO_2) producido por las actividades industriales y agrícolas ha provocado un aumento de las concentraciones atmosféricas de CO_2 de aproximadamente 280 a 387 partes por millón (ppm). La concentración atmosférica de CO_2 de la atmósfera terrestre es hoy en día más alta de lo que ha sido durante más de 800,000 años (Lüthi *et al.* 2008), y se espera que continúe aumentando a un ritmo acelerado (Figura 1 y 2), lo que provocará aumentos significativos de la temperatura en la atmósfera y en la superficie del océano a lo largo de las próximas décadas.

Durante la era industrial, el océano ha absorbido hasta el 30% de las emisiones antropogénicas (producidas por el hombre) de CO_2 (Sabine & Feely 2007; Canadell *et al.* 2007). Esta absorción tiene, en parte, un efecto beneficioso al reducir significativamente el crecimiento de los niveles de CO_2 en la atmósfera, disminuyendo el calentamiento global. Sin embargo, cuando el CO_2 es absorbido por el agua de mar, se producen reacciones químicas que reducen su pH así como la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}) y los estados de saturación de los minerales de CaCO_3 biológicamente importantes calcita y aragonita (Figura 1 y 3) en un proceso comúnmente denominado acidificación de los océanos (Caldeira & Wickett 2003). Concretamente se predice que el pH de los océanos superficiales, con una media actual de $\sim 8,2$, caerá por debajo de pH 7,7 durante los próximos 85 años (Caldeira & Wickett 2005).

La acidificación de los océanos difiere del calentamiento global en que su impacto se deriva de la química del dióxido de carbono (CO_2) en el agua de mar, más que de su acción física como un gas de efecto invernadero en la atmósfera. Esto

significa que incluso si el planeta no se calienta, el aumento del CO₂ atmosférico inevitablemente aumentará la acidez del océano. El Océano Antártico es particularmente vulnerable a este fenómeno, debido a la mayor solubilidad del CO en aguas frías. Las presentes estimaciones son que si las emisiones de carbono continúan la tendencia actual, solo en lo que queda de siglo se producirá un cambio en la acidez del océano mayor que cualquier cambio ocurrido durante los últimos millones de años. Muy probablemente la respuesta oceánica a este fenómeno tenga graves consecuencias para los ecosistemas marinos que son la base de importantes actividades económicas y sociales, como la pesca, la acuicultura y el turismo (Howard & Sandford 2008) .

Actualmente existen diversos estudios que demuestran cambios en el crecimiento y en la estructura de los organismos marinos en respuesta a la acidificación de los océanos observándose, por ejemplo, que los esqueletos de algunos organismos marinos microscópicos se están volviendo más delgados y frágiles (Hoegh-Guldberg 2007, Fabry 2008a, Goffredo *et al.* 2014). Estas evidencias suponen una advertencia de los impactos potencialmente graves que la acidificación de los océanos podría tener ya incluso dentro del propio siglo XXI, impactos que podrían afectar a la sostenibilidad y la gestión de muchos ecosistemas marinos, así como a las comunidades humanas que dependen de ellos. Esta monografía pretende revisar algunos de los aspectos más relevantes sobre las consecuencias bióticas de este fenómeno en el caso concreto de los organismos calcificadores marinos, poniendo especial interés en aquellos trabajos realizados en el Océano Antártico, el cual ha sido hasta ahora muy poco estudiado. Además se pretende evaluar las posibles acciones futuras para afrontar el fenómeno de la acidificación oceánica.

Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es el de analizar el impacto de la acidificación de los océanos en diversos organismos calcificadores marinos a través de un análisis bibliográfico. Los objetivos específicos son:

- Evaluar los posibles efectos bióticos de la acidificación oceánica en organismos calcificadores marinos a nivel global.
- Analizar los estudios existentes en organismos calcificadores en el Océano Antártico.
- Estudiar las posibles acciones futuras que ayuden a entender y/o revertir la problemática relacionada con la acidificación oceánica.

Metodología

1. Recogida de antecedentes a través de los conocimientos entregados por los expositores del diplomado y a través de interacciones directas con los mismos.
2. Búsqueda de información en las bases de datos de diversas agencias y comités Antárticos como SCAR, *Scientific Committee on Antarctic Research* (<https://www.scar.org/>), BAS, *British Antarctic Survey* (<https://www.bas.ac.uk/>) o la *Australian Antarctic Division* (<http://www.antarctica.gov.au/>).
3. Búsqueda de información científica en Internet utilizando las siguientes herramientas: Pubmed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>), Web of Science (<https://login.webofknowledge.com>), Google Académico (<https://scholar.google.cl/>) y WorldCat (<https://www.worldcat.org/>). Las palabras clave, en Castellano e Inglés, que se utilizaron en la búsqueda fueron las siguientes: acidificación oceánica, océano Antártico, organismos calcificadores, organismos bentónicos, briozoos, foraminíferos, plancton, *ocean acidification*, *Southern ocean*, *calcifying organisms*, *benthic organisms*, *bryozoans*, foraminifers, plankton.
4. Análisis de datos y confección del material monográfico.

Desarrollo

Capítulo 1. Efectos de la acidificación oceánica en organismos calcificadores marinos.

Hasta el día de hoy se han realizado varios trabajos científicos sobre el efecto de la acidificación de los océanos en los organismos calcificadores, principalmente en corales y organismos planctónicos. Los principales organismos calcificadores planctónicos son los pterópodos (moluscos gastrópodos), que forman caparazones de aragonita, y los coccitíoforos (algas unicelulares) y foraminíferos (protistas ameboides), ambos secretan calcita (Figura 4, Kleypas *et al.* 2005). Estos grupos de calcificación planctónica difieren con respecto al tamaño, el nivel trófico, tiempo de generación y otros atributos biológicos (Tabla 1). Además de estos grupos planctónicos también han sido estudiados otros organismos calcificadores como corales, briozoos, equinodermos y otros moluscos no planctónicos (Figura 5, Kleypas *et al.* 2005). Se debe tener en cuenta, asimismo, que la mayoría de estudios se han centrado en especies de arrecifes de coral de aguas cálidas (Langdon *et al.* 2005; Fabry *et al.* 2008b) y/o en experimentos con organismos cultivados en el laboratorio. Los pocos ejemplos de trabajos concretos con organismos Antárticos que han sido descritos en la literatura se mostrarán en el segundo capítulo.

Al momento de analizar los resultados de los trabajos realizados es importante tener en cuenta las diferentes aproximaciones metodológicas tomadas por los investigadores. Uno de los efectos más notables de la acidificación oceánica es que las aguas superficiales cambien su composición mineral y lleguen a contener formas minerales más solubles que la calcita, como son la aragonita o la calcita de magnesio. El magnesio (Mg^{2+}) a menudo sustituye al calcio (Ca^{2+}) en los

esqueletos de calcita de los invertebrados marinos, aumentando su solubilidad de los mismos (Andersson *et al.* 2008). Por ello, una de las formas de estudiar la vulnerabilidad de los organismos calcificadores a la acidificación de los océanos es analizar la concentración de Mg de sus esqueletos o caparazones y analizar su distribución espacio-ambiental. Debido a que el pH disminuye con la profundidad del agua, se predice que los niveles de Mg en los esqueletos de calcita también deberían disminuir para contrarrestar la disolución. Varios autores han estudiado además la asociación entre la relación magnesio calcio (Mg/Ca) en las calcitas biogénicas y el pH o las concentraciones de carbonato del agua de mar. La mayoría de trabajos, no obstante, analizan directamente las tasas globales de calcificación y/o la morfología y estabilidad de los esqueletos o caparazones de los organismos calcificadores, a veces utilizando técnicas de microscopia o radiográficas.

En el caso de los estudios de la relación Mg/Ca en las calcitas biogénicas, la literatura analizada no demuestra un efecto o tendencia clara, mostrando a veces resultados disímiles entre organismos y/ o a veces entre poblaciones de una misma especie. Por ejemplo, en un estudio con foraminíferos en Namibia (Rathmann & Kuhnert 2008) no se pudo demostrar asociación entre la relación Mg/Ca del esqueleto de los especímenes estudiados y diferentes concentraciones del ión carbonato CO_3^{2-} . En el mismo sentido, en un estudio en el que se analizaron 14 especies diferentes (incluyendo erizos de mar, crustáceos, moluscos, corales y algas) tampoco se encontró asociación entre la relación Mg/Ca de los caparazones y esqueletos recién formados y los estados de baja saturación de calcita y/o aragonita en los que se cultivaron los organismos estudiados (Ries 2011). Las únicas excepciones en el citado estudio fueron un alga roja coralina (*Neogoniolithon sp.*), especie en la que disminuyó la relación Mg/Ca al disminuir la saturación de calcita, y un gusano poliqueto tubícola (*Hydroides crucigera*) en el que la relación Mg/Ca aumentó en la misma situación. Los estudios en los que se analiza la tasa de calcificación, estructura, tamaño o

consistencia de esqueletos y/o caparazones parecen ser más concluyentes, pese a no ser totalmente unánimes en sus resultados. Es el caso de los estudios realizados con varias especies de fitoplacton, concretamente de cocolitóforos, que muestran un comportamiento diferente según la especie estudiada. Dos de las especies de cocolitóforos, incluida *Emiliania huxleyi* mostraron un patrón similar al reportado para algunas especies de arrecifes de coral (Riebesell *et al.* 2000, Langdon *et al.* 2005; Fabry *et al.* 2008b), presentando tasas de calcificación reducidas en respuesta a presiones parciales de CO₂ (pCO₂) elevadas en agua de mar. Sin embargo, otras dos especies de cocolitóforos mostraron el patrón opuesto (Langer *et al.* 2006), una especie no cambió significativamente su patrón de calcificación al aumentar la pCO₂ y en el resto de especies las tasas de calcificación medidas en un rango similar de niveles de pCO₂ resultaron en una curva no lineal. Por otro lado, en experimentos de laboratorio realizados con tres especies de foraminíferos planctónicos, la masa del caparazón disminuyó en dos especies (*Orbulina universa* y *Globigerinoides sacculifer*) a medida que disminuyó la concentración de iones carbonato del agua de mar (Bijma *et al.* 2002). Un ejemplo notable de las consecuencias del aumento de pH en los océanos se observa en el caparazón de los pterópodos, unos pequeños caracoles pelágicos marinos que sirven de alimento básico para peces, ballenas y pájaros marinos. En un trabajo con dichos invertebrados se observó que los caparazones de aragonita de ciertos pterópodos se disolvían notablemente en a penas un par de días al ser sometidos a un nivel bajo de saturación de carbonato, nivel de saturación que el que el mismo grupo predijo para el año 2100 en el Océano Antártico (Orr *et al.* 2005). Estos hallazgos están de acuerdo con otras investigaciones y modelos recientes (Hauri *et al.* 2016) que indican que las condiciones perjudiciales para los ecosistemas polares podrían desarrollarse en décadas y no en siglos, como se había sugerido anteriormente.

Finalmente, el estudio de moluscos bentónicos y equinodermos adultos demuestran que estos son sensibles a los cambios en la química del agua de mar.

En respuesta a un nivel elevado de $p\text{CO}_2$, las tasas de calcificación en el mejillón *Mytilus edulis* y la ostra del Pacífico *Crassostrea gigas* disminuyeron en 25 y 10%, respectivamente (Gazeau et al. 2007). En los erizos de mar *Hemicentrotus pulcherrimum* y *Echinodetra mathaei*, el éxito de la fertilización, las tasas de desarrollo y el tamaño de las larvas disminuyeron al aumentar la concentración de CO_2 , además de observarse una formación anormal de las espículas de CaCO_3 en larvas de erizo (Kurihara & Shirayama, 2004).

Capítulo 2. Efectos de la acidificación oceánica en aguas del Océano Antártico.

Después de la búsqueda bibliográfica, y aparte de los trabajos de modelos *in silico* (Orr et al. 2005), tan sólo se pudieron encontrar dos publicaciones reportando resultados específicos sobre los efectos de la acidificación de los océanos en la mineralización de organismos calcificadores en las aguas del Océano Antártico. Este dato resulta sorprendente si se tiene en cuenta que son precisamente los océanos polares los que más acusan el fenómeno de la acidificación y de la saturación mineral (Figura 3). Pese a que algunas de las especies analizadas y expuestas en el capítulo anterior también habitan el océano más austral, la interacción con otros factores tales como los nutrientes, la luz, los metales traza, la temperatura y/o la salinidad, debe ser tomada en cuenta a la hora de extrapolar conclusiones por lo que vale la pena profundizar un poco más en ambos trabajos Antárticos.

En el primer trabajo se estudió la morfología y composición de las espinas del erizo de mar Antártico *Ctenocidaris speciosa* a diferentes profundidades en el mar de Weddell en el Océano Antártico (Catarino et al. 2013). Las espinas de este erizo cidaroide están formadas por una capa interna de calcita de magnesio recubierta por una corteza policristalina. El estudio mostró diferencias en la morfología y composición de las espinas en función de la profundidad, presentando una disminución en el contenido de Mg^{2+} y un mayor grosor de las

espinas a medida que aumenta la profundidad y, por lo tanto, el pH. Este resultado señala una característica ventajosa para el erizo, ya que reduce la solubilidad de sus espinas compensando la disminución en la disponibilidad de carbonato cálcico asociado a la profundidad, lo que podría representar un fuerte potencial de adaptación de las especies cidaroides a las condiciones de acidificación oceánica. En el segundo trabajo los autores analizaron los niveles de calcita de magnesio en esqueletos de cuatro especies de briozoos Antárticos (*Fasciculipora ramosa*, *Lageneschara lyrulata*, *Systemopora contracta* y *Melicerita obliqua*) con el fin de facilitar las predicciones de los efectos de la acidificación del océano (Figuerola et al. 2015). Los autores colectaron especímenes a varias profundidades en la Antártica oriental (Tierra Adelaida y *George V Land*) y midieron el contenido de calcita de magnesio en los esqueletos calcáreos mediante difracción de rayos X. Sólo *Fasciculipora ramosa* mostró variabilidad en el contenido de Mg a diferentes profundidades, el resto de especies no mostró cambios significativos. Estos resultados hacen pensar que diferentes factores ambientales y biológicos pueden tener una influencia variable dependiendo de la especie de briozoo, siendo probablemente estos factores responsables, al menos parcialmente, de las discrepancias encontradas entre especies y poblaciones de una misma especie, al igual que pueden ser responsables de las diferencias entre grupos taxonómicos.

Capítulo 3. Acciones futuras para entender y/o revertir la problemática relacionada con la acidificación oceánica

Tal y como recogen diversas agencias y comités Antárticos internacionales como el *Scientific Committee on Antarctic Research* (Scar 2017) o la *Australian Antarctic Division* (Howard 2008) existe un esfuerzo internacional cada vez mayor para observar y monitorear el sistema de carbonato marino haciendo énfasis en fomentar una investigación interdisciplinaria que integre el estudio de los ecosistemas, los cambios climáticos y los ciclos de carbono. Esto combinando los

estudios globales con estudios de regionales que a menudo ayudan a definir procesos y fenómenos más específicos.

En el caso de SCAR se ha designado un grupo de acción internacional para documentar la comprensión científica de la acidificación de los océanos y poder así afrontar la problemática de la acidificación de los océanos (Scar 2017). El grupo de acción consiste en un equipo interdisciplinario internacional de expertos en acidificación oceánica desde diferentes perspectivas: estudios de la química del carbonato marino, análisis de modelos globales y regionales, ecología marina, fisiología y paleoceanografía.

Dicho grupo de estudio ha definido tres recomendaciones políticas orientadas a evaluar y mitigar el efecto de la acidificación de los océanos y que se exponen a continuación (Bellerby *et al.* 2015):

- i) Reducción global en la concentración atmosférica de CO₂.
- ii) Establecimiento de un sistema y/o equipo de monitoreo internacional que sea continuo en un amplio rango de tiempo (más de una década)
- iii) Protección especial de algunos ecosistemas importantes como los Océanos Ártico y Antártico.

Actualmente el único efecto mitigador realmente efectivo y en el que todos los comités científicos y agencias Antárticas están de acuerdo, es el de la reducción drástica en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Otra de las acciones encaminadas a la mitigación del cambio climático que se ha propuesto es la fertilización oceánica. Esto implica agregar nutrientes al océano para aumentar el consumo de carbono de las plantas marinas. Si bien la fertilización del océano pudiera mejorar la transferencia de carbono de la atmósfera directamente a las profundidades del océano, el impacto que ocasionaría en aguas más profundas no es despreciable por lo que, tal y como se apunta desde la División

Antártica Australiana (Howard & Sandford 2008), esta acción debe ser exhaustiva y cuidadosamente analizada.

Otra de las acciones ineludibles y en la que mayor consenso existe es en la necesidad de buscar una estrategia científica eficaz para integrar los esfuerzos internacionales y avanzar globalmente en el conocimiento de la problemática de la acidificación oceánica. En el año 2006 tuvo lugar una reunión de trabajo en San Petersburgo (Rusia) auspiciada por la *NSF*, la *NOAA*, y el *U.S. Geological Survey*, sobre el impacto de la acidificación oceánica en corales y otros calcificadores marinos. En el resumen de dicha reunión se planteó una estrategia científica que incluye ámbitos de estudio clave, así como acciones específicas (Kleypas et al. 2006 y Tabla 2). Dichas directrices están de acuerdo y se complementan con las planteadas por el grupo de acción sobre acidificación oceánica de SCAR. A continuación se muestran los principales objetivos científicos planteados por SCAR y que están específicamente dirigidos al estudio del Océano Antártico.

- Definir nuestra comprensión actual sobre las tasas actuales y los escenarios futuros de acidificación del Océano Antártico.
- Documentar las respuestas de ecosistemas y organismos a partir de perturbaciones experimentales y registros geológicos.
- Identificar las estrategias de observación y de experimentación ya existentes.
- Identificar las lagunas existentes en nuestra comprensión sobre las tasas y la regionalidad de la acidificación de los océanos.
- Definir estrategias para futuras investigaciones sobre la acidificación del Océano Antártico.

Las acciones principales se resumen así en reducir las emisiones de CO₂ en la atmósfera, aumentar los trabajos de monitoreo y conseguir una estrategia científica eficaz para avanzar en el conocimiento del problema.

Conclusiones

Las tasas de calcificación de la mayoría de los organismos marinos estudiados por diversos autores tienden a disminuir en respuesta a la reducción de carbonato cálcico causada por la acidificación oceánica. Esta respuesta se ha observado en muchos grupos taxonómicos, desde corales de arrecifes hasta protistas unicelulares, pero no es general ni se observa en todas las especies y ambientes. Existen discrepancias que podrían deberse a diferencias experimentales o a interacciones con otros factores tales como los nutrientes, la luz, la temperatura y/o la salinidad. Asimismo, la diversidad genética intra- e inter-específica podría ocasionar diferencias en la plasticidad ecofisiológica para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes. Existe todavía una gran confusión sobre las consecuencias que una posible reducción de la calcificación podría tener sobre el funcionamiento y supervivencia de las especies y/o ecosistemas marinos, tanto a nivel global como, mayormente, a nivel del océano Antártico. Los efectos de la descalcificación tan sólo se infieren por el papel de los esqueletos y/o caparazones de CaCO_3 de los organismos estudiados, ya que los factores que impulsan la calcificación biogénica son todavía poco conocidos. Se ha predicho, además, que los episodios en los que la cantidad de carbonato cae por debajo del límite mínimo durarán cada vez más y serán más frecuentes señalando que al final de siglo esos periodos podrían abarcar casi todo el año. Está muy poco claro si los organismos marinos más vulnerables serán capaces de adaptarse.

En definitiva, todavía no se conocen las respuestas de los organismos al aumento de la acidez oceánica, ni cómo éstas alterarán las redes alimentarias marinas y la biodiversidad. Avanzando en el conocimiento a través de la integración de diferentes disciplinas científicas es como podremos, en un futuro próximo, afrontar el problema de la acidificación oceánica, así como del cambio climático.

Bibliografía

- Andersson AJ, Mackenzie FT, Bates NR. 2008. *Life on the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers. Marine Ecology Progress Series, 373: 265-273.*
- Bellerby R, Lo Monaco C, Lovenduski N, Lenton A, Haruko K, Trimborn S, Hoppema M, Suckling C, Meridith M, Murphy E, Constable A. 2015. *Southern Ocean Acidification. ATCM XXXVIII and CEP XVIII 2015, Sofia, Bulgaria.*
- Bijma J, Honisch B, Zeebe RE. 2002. *Impact of the ocean carbonate chemistry on living foraminiferal shell weight: comment on "Carbonate ion concentration in glacial-age deepwaters of the Caribbean Sea" by WS Broecker and E Clark. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 3: 1064.*
- Caldeira K, Wickett ME. 2003. *Anthropogenic carbon and ocean pH. Nature, 425(6956):365.*
- Caldeira K, Wickett ME. 2005. *Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. Journal of Geophysical Research, 110, C09S04.*
- Canadell JG, Le Quéré C, Raupach MR, Field CB, Buitenhuis ET, Ciais P, Conway TJ, Gillett NP, Houghton RA, Marland G. 2007. *Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104(47):18866-18870.*
- Catarino AI, Guibourt V, Moureaux C, De Ridder C, Compere P, Dubois P. 2013. *Antarctic urchin Ctenocidaris speciosa spines: lessons from the deep. Cah Biol*

Mar, 54:649–655.

Fabry VJ. 2008a. *Marine calcifiers in a high-CO₂ ocean*. *Science*, 320:1020-1022.

Fabry VJ, Seibel BA, Feely RA, Orr JC. 2008b. *Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes*. *ICES Journal of Marine Science*, 65: 414-432.

Figuerola B, Kuklinski P, Taylor PD. 2015. *Depth patterns in Antarctic bryozoan skeletal Mg-calcite: Can they provide an analogue for future environmental changes?* *Marine Ecology Progress Series*, 540: 109-120.

Gazeau, F., Quibler, C., Jansen, J. M., Gattuso, J-P., Middelburg, J. J., and Heip, C. H. R. 2007. *Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification*. *Geophysical Research Letters*, 34: L07603.

Goffredo S, Prada F, Caroselli E, Capaccioni B, Zaccanti F, Pasquini L, Fantazzini P, Fermani S, Reggi M, Levy O, Fabricius KE, Dubinsky Z, Falini G. 2014. *Biom mineralization control related to population density under ocean acidification*. *Nat Clim Change* 4: 593-597.

Hauri C, Friedrich T, Axel T. 2016. *Abrupt onset and prolongation of aragonite undersaturation events in the Southern Ocean* *Nature Climate Change* 6, 172-176.

Hoegh-Guldberg O, Mumby PJ, Hooten AJ, Steneck RS, Greenfield P, Gomez E, Harvell CD, Sale PF, Edwards AJ, Caldeira K, Knowlton N, Eakin CM, Iglesias-Prieto R, Muthiga N, Bradbury RH, Dubi A, Hatziolos ME. 2007. *Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification*. *Science* 318: 1737-1742.

Howard W, Rosemary S. 2008. *Developing ocean acidification policy; Australian Antarctic Magazine, Issue 15*.

- Kleypas JA, Feely RA, Fabry VJ, Langdon C, Sabine CL, Robbins LL. 2006. *Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and Other Marine Calcifiers: A Guide for Future Research, report of a workshop held 18-20 April 2005, St. Petersburg. Sponsored by NSF, NOAA, and the U.S. Geological Survey*, 88 pp.
- Kurihara, H., and Shirayama, Y. 2004. *Effects of increased atmospheric CO₂ on sea urchin early development. Marine Ecological Press Series*, 274: 161-169.
- Langdon C, Atkinson MJ. 2005. *Effect of elevated pCO₂ on photosynthesis and calcification of corals and interactions with seasonal change in temperature/irradiance and nutrient enrichment. Journal of Geophysical Research, Oceans*, 110: C09S07.
- Langer G, Geisen M, Baumann KH, Kläs J, Riebesell U, Thoms S, Young JR. 2006. *Species-specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, Volume 7*, Q09006.
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, Blunier T, Barnola JM, Siegenthaler U, Raynaud D, Jouzel J, Fischer H, Kawamura K, Stocker TF. 2008. *High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature*, 453: 379-382.
- Orr JC, Fabry VJ, Aumont O, Bopp L, Doney SC, Feely RA, Gnanadesikan A, Gruber N, Ishida A, Joos F, Key RM, Lindsay K, Maier-Reimer E, Matear R, Monfray P, Mouchet A, Najjar RG, Plattner GK, Rodgers KB, Sabine CL, Sarmiento JL, Schlitzer R, Slater RD, Totterdell IJ, Weirig MF, Yamanaka Y, Yool A. 2005. *Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature*, 437(7059): 681-686.
- Rathmann S, Kuhnert H. 2008. *Carbonate ion effect on Mg/Ca, Sr/Ca and stable isotopes on the benthic foraminifera *Oridorsalis umbonatus* off Namibia. Marine*

Micropaleontology, 66: 120-133.

Riebesell, U, Zondervan I, Rost B, Tortell PD, Zeebe RE, Morel, FMM. 2000. *Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂*. *Nature*, 407: 364-367.

Ries BR. 2011. *Skeletal mineralogy in a high-CO₂ world*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 403: 54-64.

Sabine CL, Feely RA. 2007. *The oceanic sink for carbon dioxide*. Greenhouse Gas Sinks. Reay D, Hewitt N, Grace J, Smith K eds, CABI Publishing, Oxfordshire, UK. Pp. 31-49.

Scientific Committee on Antarctic Research, sección *Southern Ocean Acidification*. <https://www.scar.org/science/acidification/about/> - visitada los días 27 de octubre y 1 de noviembre del 2017.

Figuras

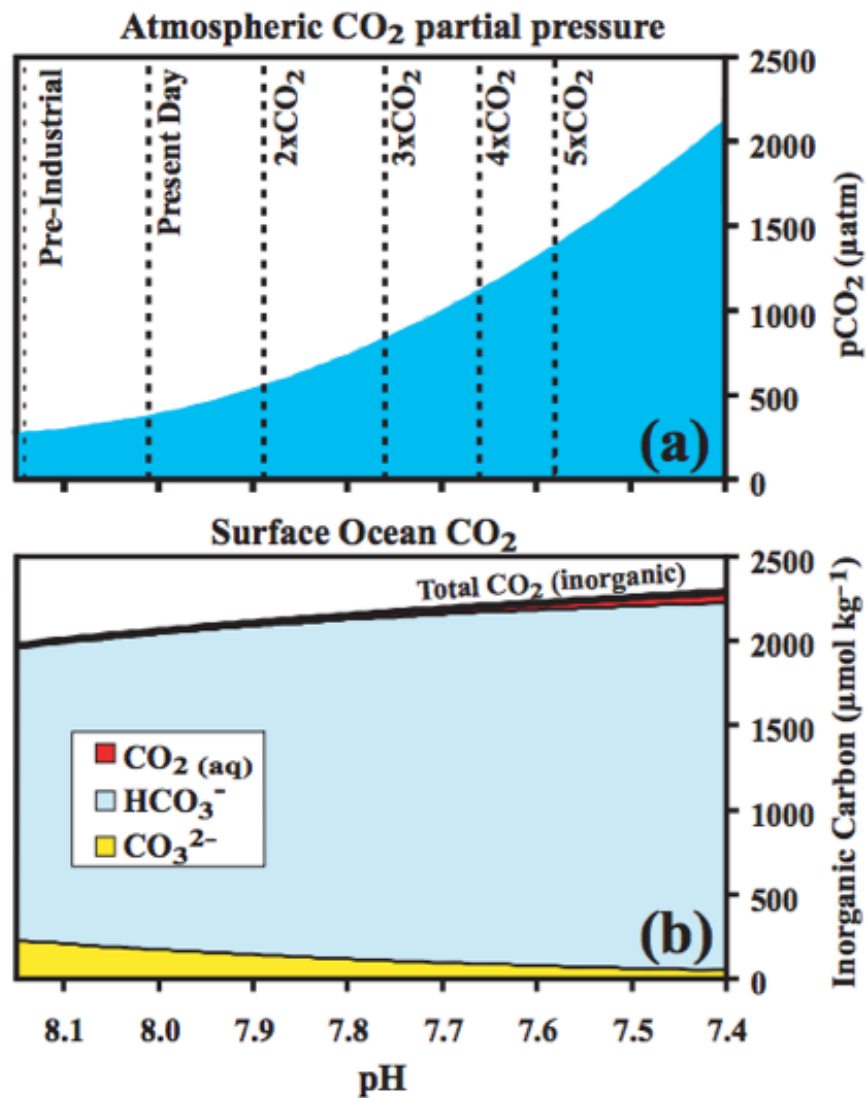


Figura 1. (a) Aumento de la presión parcial de CO₂ atmosférico y (b) cambios asociados en la química de carbonato de la superficie del océano. Fuente: Kleypas *et al.* 2005

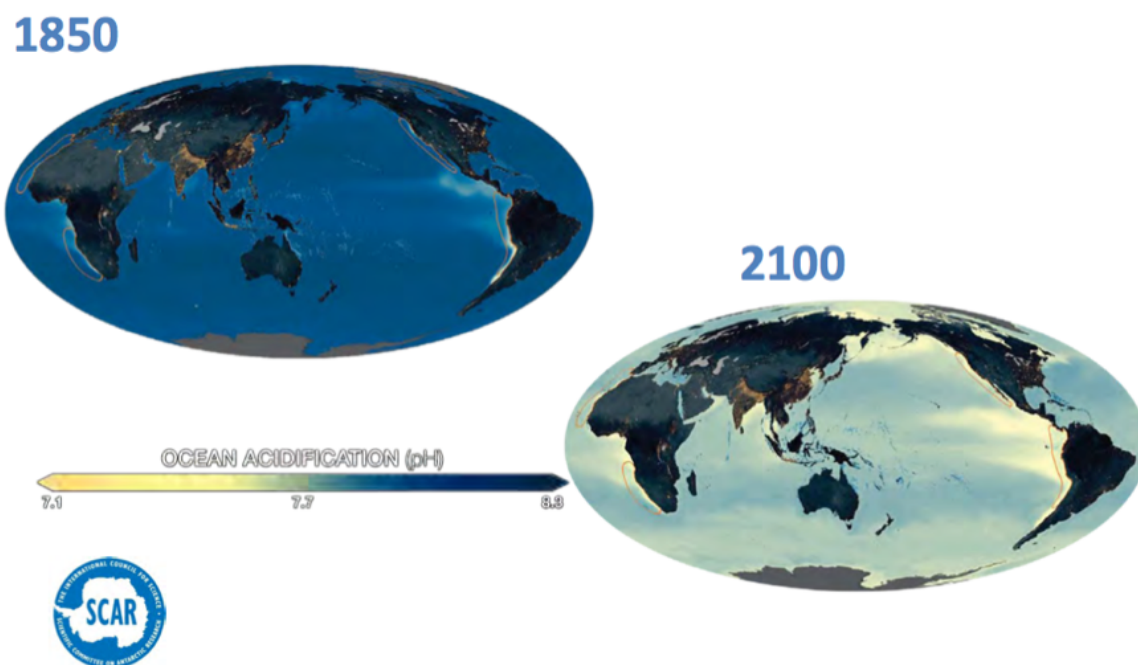


Figura 2. Simulaciones del cambio de pH de los océanos del planeta para el próximo siglo. Fuente: *SCAR Action Group on Ocean Acidification* (<https://www.scar.org/antarctic-treaty/actm-papers/atcm-xxxviii-and-cep-xviii-2015/3485-atcm38-scar-lecture-bellerby-2015/>) 1 de noviembre 2017.

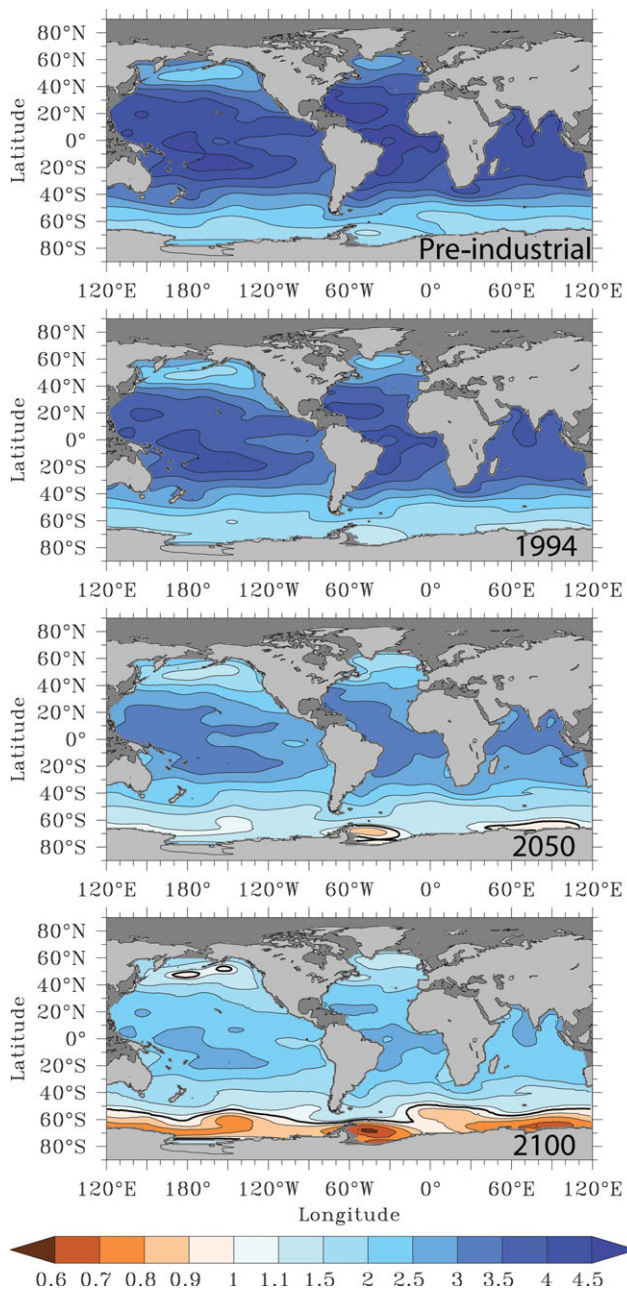


Figura 3. Estado de saturación de aragonita (Ω_{arag}) en agua superficial para el océano preindustrial (año nominal 1765) y los años 1994, 2050 y 2100. Cuando $\Omega_{arag} < 1$ la aragonita se disuelve. Fuente: Fabry *et al.* 2008.

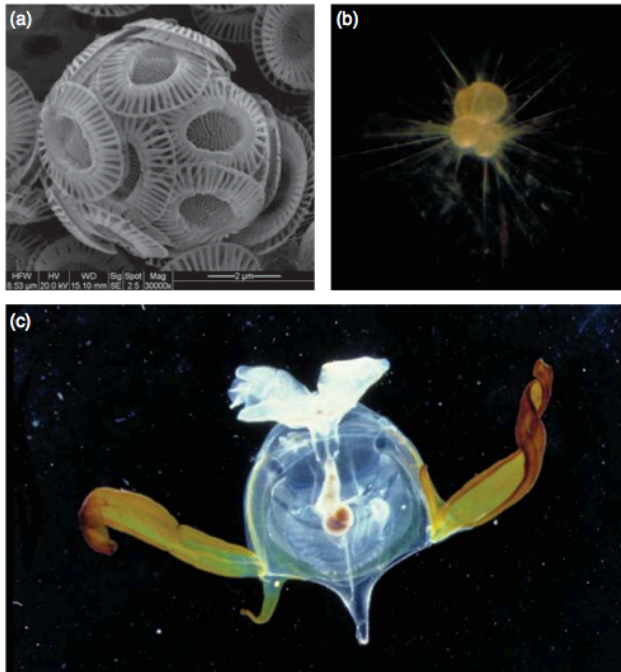


Figura 4. Representantes de los principales calcificadores planctónicos: a) el coccolitóforo *Emiliana huxleyi*; (b) un foraminífero planctónico y (c) el pterópodo eutomatosomático *Cavolinia tridentata*. Fuente: Kleypas *et al.* 2005.

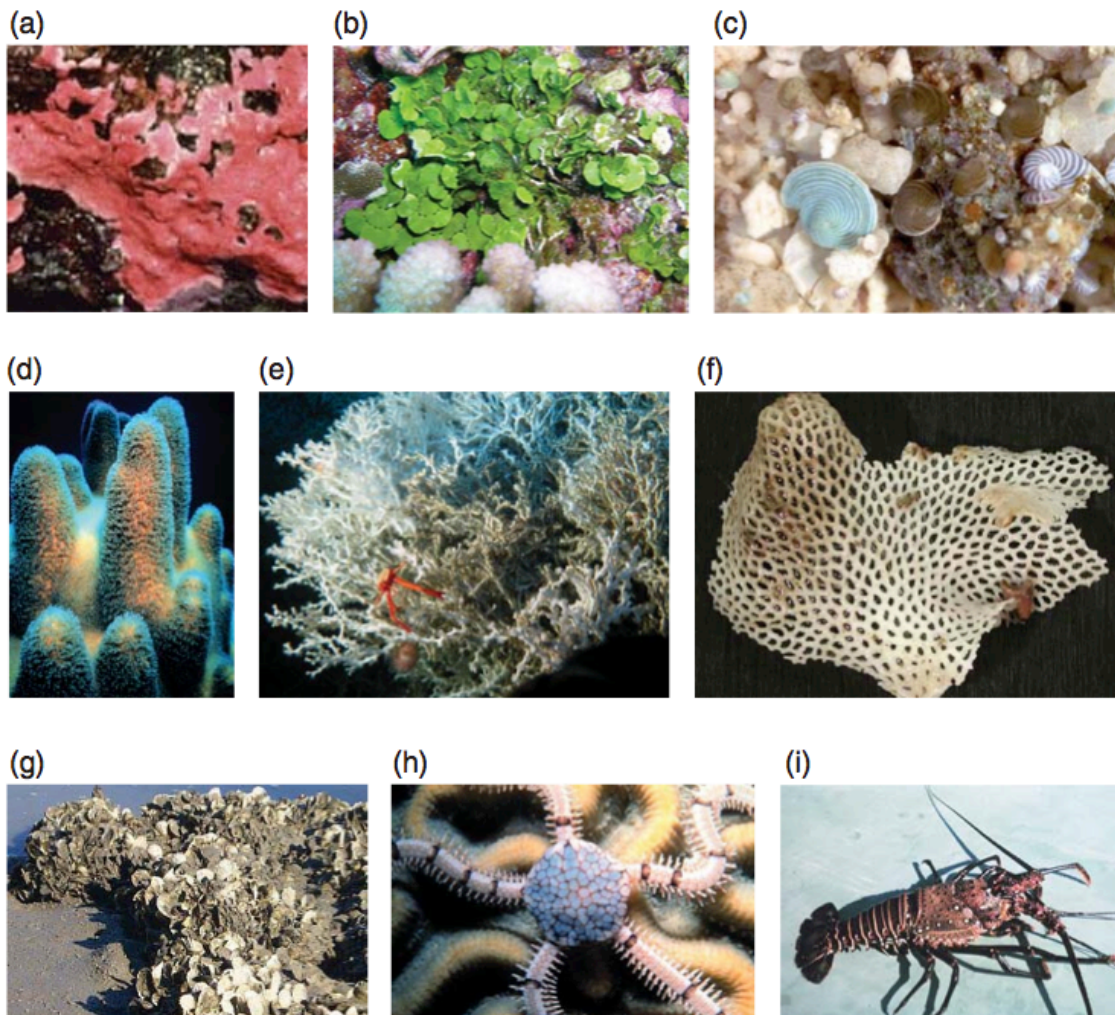


Figura 5. Representantes de los principales calcificadores bénticos: (a) algas coralinas; (b) *Halimeda*; (c) foraminíferos bentónicos; (d) corales constructores de arrecifes (*Dendrogyra cylindrus*); (e) coral de aguas profundas (*Lophelia pertusa*); (f) briozoo; (g) moluscos (arrecife de ostras); (h) equinodermo (estrella frágil); (i) crustáceos (langosta). Las respuestas de calcificación de muchos de estos grupos no se han investigado. Fuente: Kleypas *et al.* 2005.

Tablas

Tabla 1. Funciones inferidas para el esqueleto o caparazón de algunos organismos bentónicos. Fuente: Kleypas *et al.* 2015.

| Function | Planktonic | Benthic |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|
| Protection | all groups | all groups |
| Buoyancy regulation | coccolithophores, foraminifera | |
| Light modification | coccolithophores | corals |
| Provide protons for conversion of HCO_3^- to CO_2 for photosynthesis | coccolithophores | calcareous algae? |
| Facilitate bicarbonate-based photosynthesis | coccolithophores | |
| Aid in capture of prey | foraminifera | |
| Reproduction | foraminifera, some pteropod species | corals? |
| Prevention of osmotically induced volume changes | coccolithophores | |
| Extension into hydrodynamic regime | | corals, calc. algae, bryozoans |
| Anchoring to substrate | | corals, calc. algae, bryozoans |
| Competition for space | | corals, calc. algae, bryozoans |

Tabla 2. Áreas científicas claves para el avance en el conocimiento de los efectos de la acidificación oceánica, junto con la actividades específicas propuestas. Fuente: Adaptado de Kleypas *et al.* 2015.

| Research Area | Activity |
|--|--|
| Carbonate system monitoring | <p>Identify key areas for monitoring</p> <p>Standardize measurements, reporting</p> <p>Coordinate carbonate system monitoring with existing observational systems</p> <p>Increase monitoring, particularly in regions with high variability</p> <p>Develop technology: autonomous sensors for carbonate system and PIC; remote sensing applications</p> <p>Conduct experiments on dissolution and its response to increased CO₂ (including better understanding of thermodynamic constants for high-Mg calcite)</p> |
| Physiology of calcification | <p>Conduct experiments to determine the various mechanisms of calcification and the photosynthesis/calcification relationship in autotrophs and in heterotrophs with photosynthetic symbionts</p> |
| Calcification response and organism response | <p>Develop and standardize methods for measuring calcification rates</p> <p>Investigate calcification response across multiple taxa: coccolithophorids; planktonic and benthic forams; pteropods; reef-building and deep-sea corals; <i>Halimeda</i>; coralline algae; echinoderms; bryozoans; molluscs</p> <p>Investigate effects of multiple controls on calcification (e.g., pCO₂, T, light, nutrients)</p> <p>Investigate potential for organisms to adapt</p> <p>Investigate multiple life-stages of organisms</p> <p>Develop field-based experiments to more realistically simulate pCO₂ effects on calcification</p> <p>Develop skeletal proxies for paleo-calcification analysis</p> |
| Ecosystem response | <p>Engage benthic and planktonic ecologists and modelers to identify key needs and design research to address ecosystem response</p> <p>Develop and begin long-term monitoring and/or long-term experiments on ecological communities; coordinate with existing ecological monitoring</p> <p>Develop appropriate ecosystem models for planktonic and benthic communities</p> |
| Biogeochemical response | <p>Open ocean—investigate ecosystem shifts and feedbacks on calcification, sedimentation, carbon cycle</p> <p>Quantify “reef-building” and CaCO₃ budgets of other benthic systems</p> <p>Develop technology such as remote-sensing applications</p> |

