

PRESUPUESTO DE CARBONO EN ARRECIFES CORALINOS DE MÉXICO

HÉCTOR REYES-BONILLA, LUIS E. CALDERÓN-AGUILERA,
M. CECILIA MOZQUEDA-TORRES y JOSÉ D. CARRIQUIRY

RESUMEN

El carbono, elemento omnipresente en los arrecifes coralinos, se halla predominantemente en forma de carbonato de calcio, ya que los esqueletos de muchas especies y la estructura física del ecosistema están formados por este compuesto. Los tejidos de los seres vivos del arrecife contienen car-

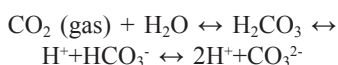
bono adquirido por la fotosíntesis y la heterotrofia, procesos que constituyen la red trófica del ecosistema. Este trabajo describe dichos procesos y los servicios ambientales que ofrecen los arrecifes coralinos en las costas mexicanas del Atlántico y el Pacífico.

Los arrecifes coralinos son ecosistemas tropicales bien conocidos por la alta diversidad y riqueza de especies que albergan. Ofrecen gran variedad de servicios ambientales que representan importantes ingresos para las comunidades humanas que viven en sus alrededores. No obstante su gran diversidad, la situación actual de los arrecifes dista de ser adecuada: las actividades humanas y sus impactos directos (pesca, turismo, sedimentación) e indirectos (escurrimiento de nutrientes provenientes de tierras altas, aumento de susceptibilidad a enfermedades) están afectando de manera irreversible a estos ecosistemas (Veron *et al.*, 2009).

Adicionalmente a los impactos humanos directos, los efectos del calentamiento global han llamado la atención de los investigadores, no solo por los daños en la fauna y flora marina causados por el incremento de temperatura, sino también por el riesgo que implica un aumento en la acidificación del océano, lo

cual podría afectar la calcificación de los corales y los impactos colaterales que todo ello conlleva sobre las redes tróficas (Manzello *et al.*, 2008). Considerando los fenómenos citados, el objetivo de este trabajo es presentar un resumen de los principales procesos de entrada y salida del carbono en los arrecifes de coral, haciendo énfasis en la información que se tiene disponible para las aguas costeras de México. Los datos aún son escasos, pero permiten tener una primera aproximación a la situación nacional en la actualidad.

El sistema de carbonatos en el agua de mar se entiende de la siguiente manera:



Esta ecuación reversible indica que el CO₂ que entra de la atmósfera al océano reacciona con el agua formando ácido carbónico y sus productos de disociación, bicarbonato y carbonato.

La suma de todas las especies químicas del CO₂ disuelto se denomina CO₂ inorgánico total: TCO₂ = [CO₂] + [HCO₃⁻] + [CO₃²⁻] (Álvarez Borrego, 2007; Fabry *et al.*, 2008).

La fotosíntesis consume CO₂, lo que lleva a la ecuación hacia la izquierda, por lo que la concentración de H⁺ disminuye y en consecuencia el pH aumenta; por el contrario, la respiración desplaza la ecuación hacia la derecha, aumentando la concentración de H⁺ dando lugar a que el pH disminuya.

Los Arrecifes de México

En México los arrecifes se encuentran distribuidos en todas sus costas (Figura 1): En el sur del Golfo de México existen sistemas frente a Tuxpan, el Puerto de Veracruz y Antón Lizardo, los cuales han sido estudiados desde hace décadas, y ofrecido sus servicios ambientales al país desde hace más de cinco siglos. Hacia el Este del Golfo, en el Banco

PALABRAS CLAVE / Acidificación / Carbonatos / Erosión Química y Biológica / Redes Tróficas / Servicios Ambientales /

Recibido: 02/10/2012. Modificado: 21/08/2014. Aceptado: 05/09/2014.

Héctor Reyes Bonilla. Doctor en Biología Marina y Pesquerías, University of Miami, EEUU. Profesor-investigador, Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), México. e-mail: hreyes@uabcs.mx

Luis E. Calderón Aguilera. Doctor en Ciencias del Mar, Universidad Politécnica de Cataluña, España. Investigador, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. Dirección: Departamento de Ecología Marina, CICESE. e-mail: leca@cicese.mx

M. Cecilia Mozqueda Torres. Licenciada en Biología Marina, UABCS, México. Maestra en Ciencias, CICESE, México.

José D. Carriquiry. Doctor en Geoquímica Marina, McMaster University, Canadá. Investigador y Profesor, Universidad Autónoma de Baja California, México.

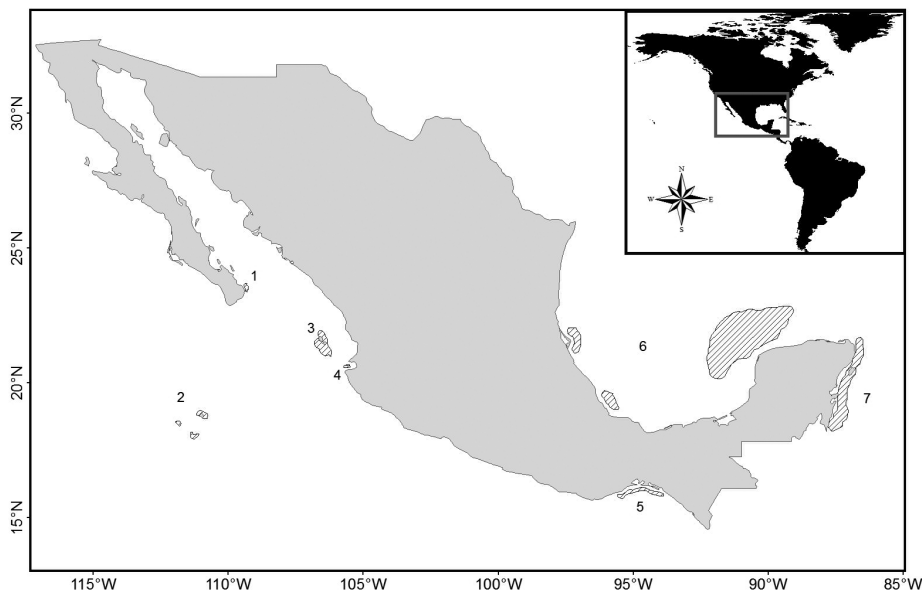


Figura 1. Localización de los arrecifes coralinos de México. 1: Cabo Pulmo; 2: Islas Revillagigedo; 3: Islas Marietas e Isabel; 4: Islas Marietas; 5: Bahías de Huatulco; 6: Cayo Arcas, Cayo Arenas, Triángulo y Arrecife Alacranes (Golfo de México); 7: Sistema Arrecifal Mesoamericano (Rivera Maya).

de Campeche y el norte de Yucatán existe una serie de bajos y arrecifes emergidos (Cayo Arcas, Cayo Arenas, Triángulos y Alacranes), famosos tanto por su alta diversidad de especies como por el hecho de que han sido impactados por las actividades de extracción petrolera. En el Caribe mexicano, los arrecifes de coral están muy bien desarrollados y aparecen prácticamente a todo lo largo de la costa de Quintana Roo. Su presencia aporta múltiples beneficios que sostienen la enorme actividad hotelera de ese estado, y representan ingresos de cientos de millones de pesos anualmente por concepto de visitas turísticas.

En la costa occidental de México también se desarrollan arrecifes coralinos, aunque mucho más simples biológicamente y de menor extensión espacial. Los mejores ejemplos aparecen en los alrededores de Huatulco, Oaxaca y en Zihuatanejo, Guerrero, aunque también hay sistemas importantes al sur de Manzanillo, Colima, en las Islas Marietas y la playa de Tenacatita, Jalisco, y en el Parque Nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur, actualmente foco de interés internacional por la existente amenaza de su destrucción, en caso de llevarse a cabo desarrollos turísticos que se tienen contemplados en esa última zona. Los arrecifes del occidente no han sido muy valorados desde la perspectiva turística, pero representan eslabones clave para sostener el alto nivel de pesca artesanal que distingue a la región.

Son pocos los países que tienen arrecifes de coral en los dos océanos, lo que incrementa la biodiversidad marina de la nación. De maneja favorable

para estos ecosistemas, México cuenta con un programa nacional de protección a los arrecifes, pues muchas zonas han sido protegidas convirtiéndolas en Áreas Naturales Protegidas y Parques Marinos, coordinados por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Esta Comisión se encarga de vigilar que las zonas protegidas no sean depredadas por las actividades humanas y participa activamente con investigadores y organizaciones de educación ambiental.

Fuentes de Carbono Inorgánico en los Arrecifes Coralinos

La característica distintiva de un arrecife de coral es su estructura física. En un sistema típico, los corales vivos representan solo la parte superficial expuesta, la cual crece a relativamente alta velocidad (1-5 cm/año) sobre una matriz de roca caliza depositada por procesos de biomineralización, de forma muy gradual (<1,5 cm/año) y a lo largo de cientos o miles de años (Allemand *et al.*, 2011). Aún en los sitios donde la cobertura de coral sobre el fondo llega a ser alta, la estructura no está compuesta únicamente de esqueletos de celenterados y sus fragmentos, ya que los corales representan solo la parte primaria de la producción de carbonatos. El complemento son los restos de otros múltiples organismos con esqueletos de aragonita o carbonato de magnesio (algas coralinas, algas frondosas como *Halimeda* spp., bivalvos, caracoles, briozoarios, esponjas, etc.), los cuales se cementan por una serie de reacciones biogeoquímicas y por procesos de

empaquetamiento de los granos dentro de las cavidades que deja la caliza (Fabry *et al.*, 2008).

La cantidad de carbonato de calcio depositado por los corales depende de las condiciones ambientales, ya que en aguas cálidas, poco productivas y muy iluminadas, los esqueletos crecen más rápido y estas zonas pueden tener una mayor tasa de crecimiento o acreción (Kleypas *et al.*, 1999a). Además, también son relevantes los aspectos filogenéticos, ya que especies de morfología ramificada (géneros *Acropora*, *Pocillopora*) crecen entre 4 y 10 cm/año, mientras que los corales masivos (*Porites*, *Monstaraea*) lo hacen lentamente, con menos de 1 cm/año (Carricart-Ganivet, 2004; Carricart-Ganivet *et al.*, 2007). Las evaluaciones realizadas sobre la cantidad de carbonato que entra a los arrecifes, medidas a partir de las tasas de crecimiento coralino, indican que aunque hay sitios donde se generan hasta 10kg CaCO₃/m²/año, siendo la mediana 4-5kg CaCO₃/m²/año. Además, si se toma en cuenta el arrecife en su totalidad (incluyendo zonas arenosas), lo normal es una cifra de apenas 1.5kg CaCO₃/m²/año, la cual se traduciría a un total bruto de 15ton de aragonita fija en la estructura arrecifal por hectárea al año, y a 2.3ton de carbono retirado de la atmósfera (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007).

Lo anterior solo describe los procesos que favorecen el depósito o acumulación neta de carbonatos en un arrecife por efecto de la producción de carbonato de calcio por los organismos calcificadores. El arrecife, sin embargo, es el resultado del balance entre las fuerzas constructivas (efectuados por los organismos calcificadores como los corales y las algas calcáreas) y destructivas (erosión física o biológica) que inciden en el cambio de masa del edificio arrecifal a través del tiempo. Debido a que la estructura arrecifal se manifiesta como un relieve positivo (un promontorio) sobre el fondo marino, ello significa que los procesos constructivos (calcificación, acumulación de sedimentos) dominan sobre los procesos destructivos (bioerosionadores, erosión física por huracanes, disolución química por cambios en la acidez del agua arrecifal, entre otros).

Un arrecife puede ser afectado a futuro en la medida en que tales procesos cambien, es decir, cuando los procesos destructivos sean más intensos que los constructivos (Manzello *et al.*, 2008). En particular para los arrecifes de coral, su balance es muy frágil, y para que la situación se invierta no requiere que se acumulen muchos factores en su contra a la vez. Por ejemplo, después del calentamiento del océano ocasionado por el Fenómeno de El Niño de 1982-83,

murió poco más del 95% de los corales que vivían en las Islas Galápagos. El sustrato desocupado que resultó de la mortandad de corales fue rápidamente cubierto por algas filamentosas, por lo cual al siguiente año las poblaciones de erizos tuvieron una explosión poblacional debido a las condiciones de 'bonanza' generadas por la muerte de corales y el incremento de grandes praderas de algas filamentosas (Cortés, 1997). Debido al herbivorismo de los erizos, al alimentarse de las algas que crecen sobre el sustrato de carbonato de calcio (esqueletos de coral recientemente muertos), van también raspando el sustrato calizo, erosionándolo de manera sistemática y exhaustiva. Diez años después del fenómeno del Niño 1982-83, las actividades de erosión por erizo habían deflacionado (erosionado hasta la base arrecifal) todo el arrecife de tal forma que los milenarios arrecifes originalmente descritos por Charles Darwin en su épico viaje, dejaron de existir (Glynn, 1990). Lo que ahora queda detrás de esos magníficos ecosistemas son solo escombros y pequeños rastros de que alguna vez hubo arrecifes de coral. Y todo esto sucedió a partir de un breve calentamiento del mar (breve, ecológicamente hablando). Es obvio, pues, que la resiliencia de los arrecifes no es elevada, como los desarrolladores desean hacer creer, y que éstos pueden ser afectados de manera muy adversa e irreversiblemente si sus condiciones ambientales cambian, tanto por causas naturales como por causas de origen humano.

Fuentes de Carbono Orgánico

Si bien el carbono depositado en los esqueletos de coral puede alcanzar grandes volúmenes, existe otra fuente de entrada neta al sistema de mayor relevancia: la generación de compuestos orgánicos producto de la fotosíntesis, proceso que llevan a cabo diversos grupos vegetales del arrecife. Los típicos productores primarios en el océano son las diatomeas, dinoflagelados, cocolitofóridos y otros protistas residentes de la columna de agua, los cuales sostienen la producción pesquera del planeta. Sin embargo, en el caso de los arrecifes de coral es manifiesta la preponderancia de las algas filamentosas (cianofitas) y coralinas (calcáreas) por lo que la medición directa de la productividad orgánica en los arrecifes de coral normalmente se hace solo para la parte béntica; la columna de agua es típicamente tan clara y transparente que prácticamente no contiene organismos fotosintetizadores suspendidos. Trabajos de revisión muestran que el promedio de producción por algas en un arrecife equivale a 1.9kg C/m²/año, y es 6 veces superior a la cantidad

depositada en el arrecife por la calcificación de corales (Marsh, 1970). Las cifras reales de productividad generada en el bentos son incluso muy superiores a las del fitoplancton, debido a la influencia de los dinoflagelados simbios (zooxantelas) presentes en el tejido del coral, que también habita en el bentos. Estos dinoflagelados aportan 80 a 130% del carbono de la fotosíntesis a sus hospederos (los corales), los cuales emplean apenas la mitad de esa energía. El resto se expulsa en forma de mucus rico en carbohidratos, el cual es consumido por los invertebrados y peces residentes de las cabezas de coral que eventualmente son la base de la producción secundaria del sistema (Birkeland, 1996; Sheppard *et al.*, 2009).

Paralelamente a los trabajos experimentales, los modelos de redes tróficas han ofrecido una visión más holística, aunque indirecta, de las cantidades de carbono que son integradas en los ecosistemas coralinos. Existen numerosos estudios sobre el tema luego que se publicó el primer modelo para los arrecifes de Hawái (Polovina, 1984), pero uno de los más completos en el sentido que incluye todos los tipos de productores primarios se llevó a cabo en Puerto Rico (Rogers, 1979). Este último autor señala que la biomasa algal (250t·km⁻²), es cuatro veces superior a la coralina (67t·km⁻²) y casi 10 veces más que la del fitoplancton (35t·km⁻²). No obstante lo anterior, la producción anual en la columna de agua (70t·km⁻²) es seis veces superior a la que realizan las algas, y 70 veces más que la de los corales. Esto se debe a la notable diferencia en tasas de recambio de biomasa entre grupos. Esta tasa de recambio en modelos tróficos de ecosistemas (también llamados de balance de masas porque supone que en un momento dado las entradas de biomasa al sistema son iguales a las salidas) se expresa como una razón de producción/biomasa (P/B) en unidades de biomasa por unidad de área por unidad de tiempo y equivale a la tasa de mortalidad. Es decir, la P/B del fitoplancton es entre 80 y 120 ton/km²/año, mientras que la de una macroalga incrustante como *Melobesia* está en el orden de 40 ton/km²/año, o la de *Penicillus* en 30 ton/km²/año (Stockman *et al.*, 1967). Para poner esto en una perspectiva económica, consideremos el caso de Cabo Pulmo, BCS., que tiene una superficie con sustrato con cobertura de corales y algas calcáreas de 2,2km² y que la P/B nada más de los componentes bénticos es de 352 ton/km²/año; el mercado internacional del carbono paga US\$ 12,80 por tonelada de C (United Nations, 2012), por lo que el servicio ambiental sería de US\$ 9912 dólares al año.

Los arrecifes coralinos juegan un rol importante en el flujo de carbono y prestan servicios ambientales que desde el punto de vista físico sirven como protección de la zona costera contra eventos de gran intensidad como tormentas y huracanes, además de evitar la erosión costera (Spalding *et al.*, 2001). El huracán Wilma en 2005 fue un claro ejemplo del papel de los arrecifes, pues los daños fueron significativamente menores en zonas con arrecifes bien conservados, mientras que los daños a los arrecifes que ya se encontraban con cierto grado de daño o deterioro alcanzaron cifras estratosféricas (Álvarez-Filip y Gil, 2006). Asimismo, es bien sabido su papel como albergues de biodiversidad, sitios de crianza y crecimiento de muchas especies, varias de ellas de importancia comercial. Por ejemplo, en Cabo Pulmo anida la tortuga verde (*Lepidochelys olivacea*) y es un sitio clave para juveniles de invertebrados comerciales, como el pepino de mar *Isostichopus fuscus*, y el caracol chino *Hapaxplex* y *Muricanthus*. Social y culturalmente los arrecifes brindan oportunidades únicas para la investigación, educación ambiental y recreación. Tienen un valor estético que permite su uso racional para el disfrute y su uso sustentable sin expectativas de explotación o provecho económico directo. En México es necesario llevar a cabo estudios para identificar especies de importancia biotecnológica, lo cual sería un servicio de incalculable valor.

Salida del Carbono

El carbono que ha sido incorporado al arrecife, ya sea por fotosíntesis o calcificación, puede perderse del sistema de diversas maneras. En el caso de las redes tróficas, los arrecifes son exportadores netos de energía hacia ecosistemas adyacentes, y se ha demostrado su íntima relación con ambientes circundantes tales como bosques de manglar, playas arenosas y pastos marinos. Además, el sistema presenta un 'acoplamiento bento-pelágico' que significa que muchos organismos que habitan el fondo o cerca del mismo (invertebrados o peces demersales) pueden ser consumidos por depredadores móviles como los tiburones, dorados y otros, y ese carbono ser llevado a regiones alejadas de donde fue originado (Arias-González *et al.*, 2004). En el caso del carbonato depositado en esqueletos o en la matriz arrecifal misma, éste se puede perder por raspado de peces loro (familia Scaridae), cochitos (Balistidae) y otros, que lo erosionan al alimentarse de algas (Spalding *et al.*, 2001). Además, el

efecto destructivo adicional causado por esponjas, sipuncúlidos, quitones, poliquetos y otros grupos, también es elevado. Todos estos sedimentos generados por actividades normales de bioerosión son depositados en el sistema arrecifal e incluso exportados a sitios distantes al arrecife. Finalmente, se ha demostrado que el crecimiento coralino genera 0,6mol C por cada mol de CaCO_3 depositado, es decir, bajo la perspectiva biogeoquímica, estos ecosistemas son fuentes, y no sumideros, de carbono. Sin embargo, hay que recordar que las cifras de fijación de este elemento por fotosíntesis señaladas arriba indican inequívocamente que tomando toda la información en consideración, los arrecifes son depósitos finales de carbono que originalmente procedió desde la atmósfera.

La mayor preocupación actual relativa a la pérdida de carbonatos en arrecifes es la acidificación de los océanos. El fenómeno comenzó a llamar la atención en la década pasada una vez que fue identificado por los modelos de cambio climático. Mas recientemente se ha visto que la disminución de pH afecta a los corales de formas distintas, como evitar el reclutamiento de sus larvas, afectando su éxito reproductivo, deteniendo su crecimiento y debilitando la matriz arrecifal, la cual se hace susceptible a ser destruida por agentes antropogénicos y naturales (Guinotte y Fabry, 2008).

La NOAA (<http://coral-reefwatch.noaa.gov/satellite/oa/index.html>) presenta mapas sobre la condición mensual de diversas variables oceanográficas como el estado de saturación de la aragonita (Ω_{arag}), la alcalinidad total, el CO_2 total y la concentración de iones carbonato y bicarbonato, en una serie de tiempo iniciada en enero de 1988. La información muestra cómo a fines de los 1980s, el valor de Ω_{arag} superaba 4,0 en promedio a lo largo del Caribe, Bahamas y el sur de Florida, y tenía cifras bajas en el norte del Golfo de México y las Bermudas. En contraste, para 2011 el valor de Ω_{arag} era inferior a 4,0 en toda la región, e incluso en el norte del Golfo de México y la península de Florida llega a ser de 3,0, lo que está por debajo del mínimo aceptable para el desarrollo arrecifal (Kleypas *et al.*, 1999b). No existen datos finos para ninguna otra región del mundo, pero se sabe que en áreas como el Pacífico oriental, donde dominan condiciones de alta productividad, el Ω_{arag} es apenas superior a 3,0 lo cual hace complejo que en esta región se desarrollen estructuras arrecifales de gran calado. La ocurrencia de arrecifes sanos en el Pacífico Oriental con valores por debajo de 3,0 de Ω_{arag} , indica que si la

adaptación a estas condiciones es eficiente y probablemente los arrecifes coralinos en el resto de los océanos se verán menos dañados que lo esperado por los efectos de la acidificación en décadas por venir (Mozqueda Torres, 2011). Sin embargo, esto no implica que de seguir disminuyendo el Ω_{arag} en los océanos, los arrecifes sigan ejerciendo sus funciones ecológicas y servicios ambientales con la misma eficiencia en la densidad de sus esqueletos.

Flujo de Carbono en Arrecifes Mexicanos

Durante las últimas dos décadas el conocimiento sobre los flujos de carbono en arrecifes de México se ha acrecentado, en buena parte con el fin de conocer la situación actual de estos ecosistemas y evaluar potenciales efectos del cambio global. Uno de los estudios más detallados presenta un análisis de la producción bruta de carbonatos en varias zonas del Pacífico (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007). Estos autores calcularon la densidad de los esqueletos de las especies y géneros coralinos más comunes en esa región (*Pocillopora* spp., *Pavona* spp., *Porites panamensis*), y con base en su tasa de crecimiento y su abundancia, estimaron la cantidad anual depositada de carbonato de calcio. La tasa de depósito de carbonatos en el arrecife de Cabo Pulmo (23,5°N, en el Golfo de California) bajó de 15 kg/m²/año en 1987 a menos de 5 kg/m²/año en 2006, mientras que en La Entrega (Bahías de Huatulco, Oax.), la reducción fue de 15 a 8 kg/m²/año entre 1997 y 2003 (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007). Estos cambios drásticos se debieron a la pérdida de cobertura coralina resultante de eventos de blanqueamiento de coral, en 1987 y 1997, causados por El Niño. Al mismo tiempo, los arrecifes de Tenacatita, Jalisco (20°N) permanecieron estables en 2002 y 2003 (entre 14 y 16 kg/m²/año), ya que la zona presentó menores anomalías de temperatura. Finalmente, si tomamos la regla de que por cada 1.5kg CaCO_3 /m²/año se generan 168g CO_2 /m²/año, podemos estimar que en el caso de Cabo Pulmo y La Entrega (ambos sitios con ~5kg CaCO_3 /m²/año) en 2003 se estaban produciendo alrededor de 560g C/m²/año, o 1.5g C/m²/día. El volumen en la zona de Tenacatita debe ser unas tres veces mayor, dada su alta cobertura coralina.

Sobre los efectos actuales y futuros de la acidificación en arrecifes de México hay poca información aún. Los mapas de NOAA indican que la saturación de aragonita en el Golfo de México ha ido a la baja mucho más

rápido que lo que se ha visto en el Caribe mexicano, aunque en todos lados la disminución es patente como resultado de la acidificación. Sin embargo, las cifras están lejos del valor de Ω_{arag} de 1, indicativo de que los carbonatos entran en disolución en el agua. Pese a ello, esta disminución en la concentración del Ω_{arag} pudiera conducir a una reducción en la densidad de los corales y por lo tanto una mayor fragilidad. Por otro lado, López-Pérez *et al.* (en prensa) analizaron el estado actual del Ω_{arag} en cuatro arrecifes del suroeste del Golfo de California, y desde superficie hasta -50m (Figura 2). Se determinó que los sistemas de la Región de Los Cabos (22°N) presentan condiciones aceptables para el crecimiento coralino en verano y otoño, aunque solo a profundidades máximas de 20m. Por otra parte, entre Cabo Pulmo (23,5°N) y Loreto (25°N) el valor promedio de Ω_{arag} es >3,2, y puede pasar de 3,6 en septiembre, mientras que las condiciones aptas para el desarrollo del coral llegan a los -30m. No obstante ello, los autores concluyen que al comparar la situación de estos arrecifes y la de otros en zonas más tropicales del país, los del golfo están en condiciones marginales, quizá debido a que esta zona es altamente productiva y no típica del resto de las condiciones arrecifales en el mundo.

Si bien la acidificación oceánica ha recibido gran atención por parte de los científicos y de los gobiernos, por los impactos que generaría en los sistemas de producción del mundo, la información que empieza a surgir en la literatura científica indica que en los océanos siempre han existido variaciones de pH a escala diaria mucho más intensas que la que los modelos climáticos vaticinan sobre la acidificación oceánica, y aun así la fauna y flora marina se han desarrollado con amplio margen de tolerancia a estos cambios en el pH oceánico (Doney *et al.*, 2009). Lo anterior indica que es necesaria mayor investigación sobre los impactos específicos en cada región en lo que respecta a la salud de los ecosistemas y el cambio global, ya sea por efectos del calentamiento y/o por la acidificación oceánica.

Por otra parte, las tasas de calcificación también pueden reducirse por efecto del estrés térmico. En un estudio que incluyó una enorme base de datos, De'ath y colaboradores (2009) encontraron que el incremento en la temperatura y el descenso en la Ω_{arag} causaron, en promedio, una reducción del 1,44% en la tasa de calcificación de *Porites* en la Gran Barrera Arrecifal, en Australia. Por su parte, Tanzil *et al.* (2009) demostraron que en el caso de corales que viven en temperaturas promedio anuales >27°C (sur de Tailandia) ha habido un descenso de

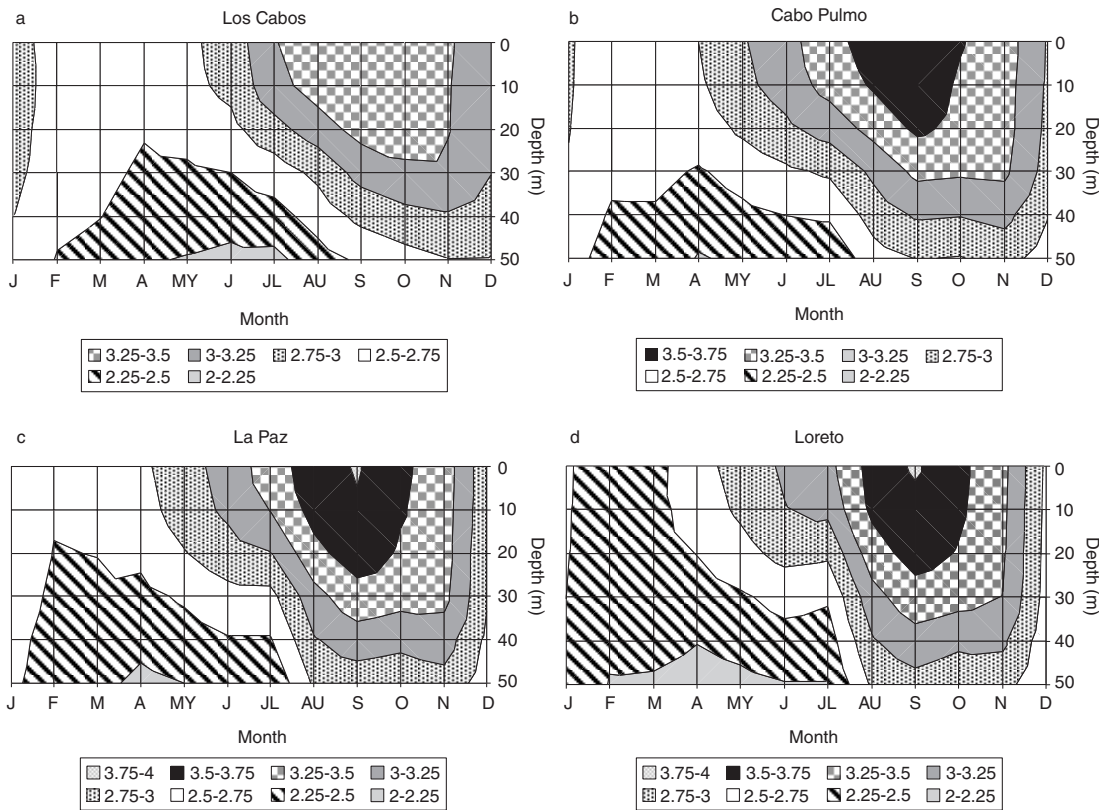


Figura 2: Valores de saturación de aragonita (arag) en arrecifes coralinos de cuatro localidades del Golfo de California. Tomado de López-Pérez *et al.* (en prensa).

23,5% en la tasa de calcificación debido a que durante los últimos 46 años la temperatura se ha incrementado 0,161°C por década. Sin embargo, ese efecto no es igual en todos los géneros de coral ya que mientras unos, como *Porites*, invierten en extensión y otros, como *Montastrea*, construyen esqueletos más densos (Carricart-Ganivet *et al.*, 2012).

Conclusiones

Aunque ya se tiene un conocimiento adecuado de las principales rutas de entrada y salida del carbono en los arrecifes coralinos, aún falta mucho por saberse. Es particularmente necesario llevar a cabo estudios que conjunten información sobre la captura de carbono de forma inorgánica y por medio de las redes tróficas. En el caso de México, los datos aun son escasos y ello llama a la necesidad de redoblar esfuerzos, dado que los arrecifes son el primer ecosistema marino donde el efecto del calentamiento del planeta se está manifestando de forma inequívoca. Aunado a la vulnerabilidad de los corales ante los impactos del cambio global y la posible pérdida de biodiversidad, los esqueletos de coral, al ser más frágiles, presentan mayor riesgo de daño

causado por eventos meteorológicos. Si en un momento dado, la tasa de erosión y destrucción superase la de calcificación, la complejidad estructural de los arrecifes disminuirá, reduciendo la calidad del hábitat y la diversidad. Además de perder la capacidad de absorber la energía del oleaje afectando la protección del litoral, que probablemente se verá reflejado en los ingresos anuales percibidos por los prestadores de servicios; pues los arrecifes coralinos están adquiriendo cada vez más importancia tanto económica como ecológica y social. Ante el agotamiento de las reservas petroleras, el turismo se vislumbra como una fuente de divisas fundamental y de hecho se encuentran dentro de las cinco primeras por su contribución al PIB en México. La belleza de las playas del Caribe Mexicano se debe a la existencia de arrecifes coralinos, y los procesos ecológicos que en ellos tienen lugar derivan en la producción de especies de importancia comercial que generan empleos y alimentos. De igual manera, los arrecifes y comunidades coralinas del Pacífico son ecosistemas cuya conservación debe ser prioritaria, pues aun en su menor desarrollo siguen siendo los sitios de mayor biodiversidad del margen costero del Océano Pacífico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo estuvo parcialmente apoyado por el CONACyT (Ref. 023390). Agradecemos a los compañeros y amigos que han participado en el trabajo de campo.

REFERENCIAS

Álvarez-Filip L, Gil I (2006) Effects of hurricanes Emily and Wilma on coral reefs in Cozumel, Mexico. *Coral Reefs* 25: 583-583.

Álvarez Borrego S (2007) Flujos de carbono en los golfos de California y México. En Hernández de la Torre B., Gaxiola Castro G (Eds.) *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. SEMARNAT-INE CICESE, México. 337-353.

Allemand D, Tambutté E, Zoccola D, Tambutté S (2011) Coral calcification: cells to reefs. En Dubinsky Z, Stambler E (Eds.) *Coral Reefs: an Ecosystem in Transition*. Springer. Berlín, Alemania. pp. 122-150.

Arias-González JE, Núñez-Lara E, González-Salas C, Galzin R (2004) Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecol. Model.* 172: 197-212.

Birkeland C (1996) Why some species are especially influential on coral-reef communities and others are not. *Galaxea* 13: 77-84.

Calderón-Aguilera LE, Reyes-Bonilla H, Carriquiri JD (2007) El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. En Hernández de la Torre B., Gaxiola Castro G (Eds.) *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. SEMARNAT-INE CICESE, México. pp. 215-226.

Carricart-Ganivet JP (2004) Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 302: 249-260.

Carricart-Ganivet JP, Cabanillas-Terán N, Cruz-Ortega I, Blanchon P (2012) Sensitivity of calcification to thermal stress varies among genera of massive reef-building corals. *PloS one* 7, e32859.

Carricart-Ganivet JP, Lough JM, Barnes DJ (2007) Growth and luminescence characteristics in skeletons of massive *Porites* from a depth gradient in the central Great Barrier Reef. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 351: 27-36.

Cortés J (1997) Biology and geology of eastern Pacific coral reefs. *Coral Reefs* 16: S39-S46.

De'ath G, Lough JM, Fabricius KE (2009) Declining coral calcification on the Great Barrier Reef. *Science* 323: 116-119.

Doney SC, Fabry VJ, Feely RA, Kleypas JA (2009) Ocean Acidification: The Other CO2 Problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1: 169-192.

Fabry VJ, Seibel BA, Feely RA, Orr JC (2008) Impacts of ocean acidification on marine

- fauna and ecosystem processes. *ICES J. Mar. Sci.* 65: 414-432.
- Glynn PW (1990) Coral mortality and disturbances to coral reefs in the Tropical Eastern Pacific. En Glynn PW (Ed.) *Global Ecological Consequences of the 1982-83 El Niño Southern Oscillation*. Elsevier. Amsterdam, Holanda. pp. 55-126.
- Guinotte JM, Fabry VJ (2008) Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1134: 320-342.
- Kleypas JA, Buddemeier RW, Archer D, Gattuso JP, Langdon C, Opdyke BN (1999a) Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284: 118-120.
- Kleypas JA, McManus JW, Meñez LAB (1999b) Environmental limits to coral reef development: Where do we draw the line? *Am. Zool.* 39: 146-159.
- López-Pérez RA, Reyes-Bonilla H, Calderón-Aguilera LE (en prensa) Coral reefs. En Ezcurra E, Álvarez Borrego S, Lara R, Wehnecke E (Eds.) *Environmental Status of Ecosystems of Northwestern Mexico*. Fulcrum Press. Golden, CO, EEUU. 18 pp.
- Manzello DP, Kleypas JA, Budd DA, Eakin CM, Glynn PW, Langdon C (2008) Poorly cemented coral reefs of the eastern tropical Pacific: Possible insights into reef development in a high-CO2 world. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105: 10450-10455.
- Marsh JAJr (1970) Primary productivity of reef-building calcareous red algae. *Ecology* 51: 255-263.
- Mozqueda Torres MC (2011) *Acidificación del Pacífico Tropical Oriental: Situación Actual y Pronóstico para el Desarrollo de los Arrecifes Coralinos*. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 68 pp.
- Polovina JJ (1984) Model of a coral reef ecosystem. *Coral Reefs* 3: 1-11.
- Rogers CS (1979) The productivity of San Cristobal Reef, Puerto Rico. *Limnol. Oceanogr.* 24: 342-349.
- Sheppard CRC, Davy SK, Pilling GM (2009) *The Biology of Coral Reefs*. Oxford University Press. Oxford, RU. 339 pp.
- Spalding M, Ravilious C, Green EP (2001) *World Atlas of Coral Reefs*. University of California Press. Berkeley, CA, EEUU. 424 pp.
- Stockman KW, Ginsburg RN, Shinn EA (1967) The production of lime mud by algae in South Florida. *J. Sedim. Res.* 37: 633-648.
- Tanzil J, Brown B, Tudhope A, Dunne R (2009) Decline in skeletal growth of the coral *Porites lutea* from the Andaman Sea, South Thailand between 1984 and 2005. *Coral Reefs* 28: 519-528.
- United Nations (2012) *Framework Convention on Climate Change*. United Nations. Nueva York, EEUU.
- Veron J, Hoegh-Guldberg O, Lenton T, Lough J, Obura D, Pearce-Kelly P, Sheppard C (2009) The coral reef crisis: The critical importance of a < 350ppm CO2. *Mar. Pollut. Bull.* 58: 1428-1436.

CARBON BUDGET IN CORAL REEFS OF MEXICO

Héctor Reyes-Bonilla, Luis E. Calderón-Aguilera, M. Cecilia Mozqueda-Torres and José D. Carriquiry

SUMMARY

Carbon is an element that enters coral reefs as calcium carbonate, which is incorporated to the skeleton of many species and the reef framework. Photosynthesis and grazing is another way in which carbon enters the trophic web. In this paper, we describe these processes and the environmental services coral reefs provide along the coasts of the Atlantic and Pacific of México.

ORÇAMENTO DE CARBONO EM RECIFES DE CORAIS DO MÉXICO

Héctor Reyes-Bonilla, Luis E. Calderón-Aguilera, M. Cecilia Mozqueda-Torres e José D. Carriquiry

RESUMO

O carbono, elemento omnipresente nos recifes de corais, se encontra predominantemente na forma de carbonato de cálcio, já que os esqueletos de muitas espécies e a estrutura física do ecossistema estão formados por este composto. Os tecidos dos seres vivos do recife contêm carbono adquirido pela fotossíntese e a heterotrofia, processos que constituem a rede trófica do ecossistema. Este trabalho descreve ditos processos e os serviços ambientais que oferecem os recifes de corais nas costas mexicanas do Atlântico e do Pacífico.
