

# Capítulo 3

## Servicios Ambientales de Arrecifes Coralinos: El Caso del Parque Nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur

*Héctor Reyes Bonilla<sup>1</sup>*

*Patricia Alexandra Álvarez del Castillo Cárdenas<sup>2</sup>*

*Luis E. Calderón Aguilera<sup>3</sup>*

*Claudia E. Erosa Ricárdez<sup>1</sup>*

*Francisco Javier Fernández Rivera<sup>6</sup>*

*Melo, Tannia C. Frausto<sup>3</sup>*

*Betsabé Montserrat Lun a Salguero<sup>4</sup>*

*Xchel G. Moreno Sánchez<sup>2</sup>*

*Mónica Cecilia Mozqueda Torres<sup>3</sup>*

*Carlos Orión Norzagaray López<sup>5</sup>*

*David Petatán Ramírez<sup>6</sup>*

### **Resumen**

Los arrecifes coralinos ofrecen múltiples servicios económicos a las sociedades humanas; sin embargo, existen pocas evaluaciones de su relevancia bajo esta óptica en México. El presente estudio analiza cuatro servicios que provee el arrecife coralino localizado dentro del

- 
1. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Departamento Académico de Biología Marina.
  2. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.
  3. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
  4. Sociedad de Historia Natural Niparajá, A.C.
  5. Universidad Autónoma de Baja California. Posgrado en Oceanografía Costera.
  6. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Posgrado en Ciencias Marinas y Costeras.

parque nacional Cabo Pulmo, en Baja California Sur, por medio de la cuantificación de sus niveles de riqueza específica total y de la evaluación del beneficio económico resultante del secuestro de carbono de la atmósfera, la exportación de biomasa pesquera y el turismo. El monto económico total estimado como producto de estas actividades es de 1.1 millones de dólares anuales, y subraya la relevancia del sistema para el estado, dado que esta cifra representa una notable subestimación de su valor real.

## **1. Introducción**

Los arrecifes coralinos están reconocidos como ecosistemas con la más alta biodiversidad y complejidad en los océanos (Veron, 2000). Además, ofrecen recursos valiosos para las comunidades costeras por proveer beneficios sociales y culturales, así como sustanciales ventajas económicas por actividades como la pesca y el turismo (McField y Kramer, 2007). Muchos de los servicios ambientales que ofrecen los arrecifes de coral son intangibles e invaluable, pero su importancia ecológica es vital, ya que participan en los ciclos biogeoquímicos globales, proveen zonas de crianza para peces y dan protección a la línea de costa del oleaje contra daños causados por tormentas, huracanes o erosión. Además, proporcionan arena lo que da origen a las playas más atractivas, son fuente de materiales para joyería, construcción y ornato, y de ellos se obtienen productos químicos y farmacéuticos (Hoegh Guldberg et al., 2007).

Una forma eficiente de conocer la aportación que proveen los ecosistemas a la sociedad es la evaluación de sus servicios ambientales (Costanza et al., 1998). Estos procesos están relacionados entre sí, por lo cual resulta difícil hablar de servicios ecosistémicos individuales; una manera más eficiente de cuantificarlos involucra la realización de análisis desde diversas perspectivas (Wallace, 2007).

En México, el gobierno federal ha declarado varios arrecifes como parques nacionales o reservas de la biosfera, con el fin de mantener su diversidad y sus funciones en el mejor estado posible, sin menoscabo de la calidad de vida de los residentes locales o la sociedad. La bahía de Cabo Pulmo, en Baja California Sur, forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas desde 1995 (Anónimo, 2006), y en la actualidad el área es considerada como una de las más importantes de la región del mar de Cortés, ya que en sus aguas se ubica el único arrecife de coral de

la península de Baja California. Además, es una de las mejor estudiadas en México (Gámez, 2008), y presenta un excelente estado de conservación (Aburto Oropeza et al., 2011).

El objetivo de este capítulo es hacer una revisión del estado de la biodiversidad en el parque nacional Cabo Pulmo (PNCP), y posteriormente ofrecer una estimación del valor económico de tres servicios ambientales que provee el arrecife: la cantidad de carbono atmosférico secuestrado de la atmósfera y transformado en carbonato de calcio, el turismo y el potencial pesquero de la zona.

## 2. Biodiversidad

El término “biodiversidad” se refiere a la variedad de la vida en todos sus niveles jerárquicos, desde el gen hasta el ecosistema (Magurran, 2011). Un estudio holístico de la biodiversidad de una localidad dada es impracticable, dado su costo potencial en tiempo y recursos; sin embargo, se ha sugerido que la riqueza de especies es uno de los indicadores más eficientes, dado que la riqueza tiene efectos sobre la estabilidad de los ecosistemas y la diversidad de funciones ecológicas; por ende, ofrece el fundamento de la diversidad de servicios ambientales que una zona puede proveer (Perrings et al., 2009).

El objetivo de esta sección es realizar una revisión de la riqueza local de especies en el PNCP, ya que los datos más recientes sobre el tema datan del Programa de Manejo (Anónimo, 2006). En este caso, se llevó a cabo una revisión de toda la información publicada sobre las comunidades marinas del arrecife, consultando tanto literatura primaria como libros especializados, y se tomó la información solamente si el registro de la especie se refería en específico a su presencia dentro del perímetro del parque. Posteriormente, para tener un idea general del número potencial de especies que puede ocupar la zona, se consultaron cuatro bases de datos de acceso libre que presentan información georreferenciada: Brusca (2012) para invertebrados, Robertson y Allen (2006) para peces arrecifales, OBIS (Ocean Biogeographic Information System; [www.obis.org](http://www.obis.org)), y GBIF (Global Biodiversity Information Facility; [www.gbif.org](http://www.gbif.org)) para complementar los datos publicados.

La tabla 1 muestra los resultados de la recopilación de la información sobre la riqueza, arreglada por grupo taxonómico mayor (división o *phylum*). Como se observa, la zona de estudio posee una notable ri-

queza de especies marinas, sobre todo considerando que el parque solo ocupa 76 km<sup>2</sup>, y que el arrecife mismo cubre apenas el 3% de esta superficie (ca. 2.2 km<sup>2</sup>; HRB datos no publicados). La gran variedad de especies presentes en la zona ha sido discutida en variados estudios que analizan la situación del arrecife (Steinbeck y Ricketts, 1941, Brusca y Thomson 1975; Villarreal Cavazos et al., 2000), y fueron una de las bases para su declaratoria como área protegida (Anónimo, 2006).

*Tabla 1*  
Riqueza de especies en el parque nacional Cabo Pulmo,  
según diversas fuentes de información

<i>Phylum</i>	<i>Programa de Manejo</i>	<i>Artículos publicados</i>	<i>Bases de datos</i>
Flora marina			
Cyanophyta (algas verde-azules)	2	2 (f)	-
Chlorophyta (algas verdes)	8	12 (f)	-
Phaeophyta (algas cafés)	11	13 (f)	-
Rhodophyta (algas rojas)	19	41 (f)	-
Fauna marina			
Porifera (esponjas)	11	5 (b)	20 (k)
Cnidaria (corales, gorgonias)	44	22 (g)	27(k)
Bryozoa (musgos marinos)	10	-	67 (k)
Sipunculida (gusanos cacahuete)	1	1 (b)	1 (k)
Nemertea (gusanos aplanados)	2	2 (b)	1 (k)
Chaetognatha (gusanos flecha)	-	-	1 (k)
Mollusca (bivalvos, caracoles)	28	54 (i)	263 (k)
Arthropoda (cangrejos)	31	86 (d, e)	204 (k)
Echinodermata (estrellas de mar, erizos, pepinos)	29	38 (c)	52 (k)
Annelida (gusanos poliquetos)	5	82 (a)	23 (k)
Chordata (peces óseos y cartilagosos)	232	236 (j)	617 (h)
Reptilia (tortugas marinas)	5	1 (l)	-
Mammalia (mamíferos marinos)	1	22 (l)	-
Total	439	616	1,276

**Clave:** (a) Bastida Zavala, 1995; (b) Brusca y Thomson, 1975; (c) Cintra Buenrostro et al., 1998; (d) García Madrigal, 1999; (e) García Madrigal y Bastida Zavala, 1999; (f) Mateo Cid et al., 2000; (g) Reyes Bonilla et al., 1997; (h) Robertson y Allen, 2006; (i) Vicencio Aguilar, 1998; (j) Villarreal Cavazos et al., 2000; (k) Brusca, 2012; (l) Comunicación personal Jorge Urbán Ramírez (UABCS).

Tomando en cuenta los datos aparecidos en el Programa de Manejo y en las publicaciones técnicas, el número total de *taxa* registrados en el PNCP es de 616 (tabla 1), lo cual representa una mejora del 40% en relación con la relación aparecida en 2007. La diferencia más marcada se presenta en relación con grupos como los moluscos, los artrópodos y los poliquetos, así como en las macroalgas en general; esto ha resultado de una mayor atención de los investigadores hacia dichos *taxa*. También se observa que los cordados (peces y ascidias) representan el grupo taxonómico más diverso en el PNCP, con 236 especies, seguidos por los anélidos y los artrópodos, con más de 80 *taxa*. Caso contrario lo presentan grupos poco conocidos, como los briozoarios, sipuncúlidos y nemertinos, que acumulan menos de 15 especies entre ellos. Otro detalle relevante es que la información sobre grupos típicos de la columna de agua, como los miembros del fitoplancton y los quetognatos, es nula en las publicaciones y el Programa de Manejo. Esta situación se debe en gran medida a la diferencia en el número de especialistas concedores de la taxonomía de los grupos (muy alto para peces, artrópodos o moluscos, bajo para el resto). Además, es patente la poca atención que las comunidades planctónicas del sitio han recibido, y esto se demuestra porque a la fecha no se ha generado un estudio de campo que describa las condiciones oceanográficas de la bahía de Cabo Pulmo, o del parque en su totalidad.

Por otra parte, si se revisa la riqueza potencial en el sitio sobre la base de extrapolaciones realizadas a partir de bases de datos internacionales, el número esperado de especies en la localidad se duplica, y son dominantes los peces (> 600 *taxa*), los moluscos y los artrópodos (> 200 especies). La diferencia entre estos números y los actualmente registrados es notable; ello podría interpretarse diciendo que el conocimiento actual parece ser muy incompleto. Las discrepancias más marcadas existen para los tres *taxa* mayores citados, y para los equinodermos y los briozoarios, donde la cifra actual es menor a la mitad del potencial según los registros internacionales. Si bien la cifra correcta de riqueza de especies debe fluctuar entre las dos mostradas en la tabla 1, la actualmente reconocida de poco más de 600 especies debe de ser una subestimación. Al respecto, varios autores (Mateo Cid et al., 2000, para macroalgas; Reyes Bonilla et al., 1997, para gorgonáceos; Cintra Buenrostro et al., 1998, para equinodermos, y Bastida Zavala, 1995, para poliquetos) han afirmado que, para ciertos grupos, el número de *taxa* registrados en el PNCP es mucho más bajo que lo esperado. En

especial hay pobre información sobre especies de los parches arenosos ubicuos en el PNCP, sobre las especies crípticas residentes del interior de las colonias de coral, y la virtual ausencia de informes sobre las especies residentes en profundidades superiores a 30 metros. Una demostración de la importancia de analizar este tipo de ambientes la da el hecho de que existen más de veinte nuevos registros de peces para el PNCP, gracias al estudio de zonas profundas (> 25 m) y de fondo blando (HRB, en preparación).

Para terminar, un tema interesante lo representa el grupo de los moluscos, ya que, aunque se ha considerado que su baja riqueza local se debe a efectos de pesca (Arizpe Covarrubias, 2004), los autores que han trabajado la zona observan muy pocas especies (tabla 1), y datos de campo tomados entre 2005 y 2012 apoyan este concepto. Es probable que la riqueza de este grupo haya sido siempre relativamente baja, pero que la falta de una línea base confiable haya llevado a los autores a proponer ideas que probablemente no sean correctas.

En general, podemos decir que para Cabo Pulmo existe buena información sobre sus componentes bióticos, aunque se necesitan mejores datos para grupos taxonómicamente bien caracterizados, como los corales duros, los equinodermos y los peces, o poco estudiados como Bryozoa y Chaetognata, para los que el conocimiento sobre su riqueza local es virtualmente nulo. Aquí sugerimos que es necesario actualizar elencos sistemáticos para la flora y la fauna en la región, profundizar la investigación en ambientes no rocosos o someros y, finalmente, hacer un trabajo extensivo sobre las especies presentes en la columna de agua. Una vez con estos datos, podremos tener una idea más clara de la composición específica local y, por ende, sugerir con mayor precisión el tipo de servicios ambientales que la biodiversidad del PNCP puede ofrecer a las comunidades humanas que hacen uso de él.

### **3. Secuestro de carbono en forma de carbonato de calcio coralino**

El carbono representa uno de los elementos más comunes e importantes en el planeta, y es esencial para la vida en el océano, ya que se asocia con elementos como el nitrógeno y el fósforo para constituir las moléculas fundamentales de la materia viva; al mismo tiempo, su combinación con el calcio o el magnesio dan lugar a la construcción de los esqueletos de múltiples especies (Hoegh Guldberg et al., 2007).

En la atmósfera, la forma predominante de este elemento es el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que entra al océano por difusión y se incorpora a los ecosistemas gracias a la fotosíntesis de algas y fitoplancton, y como carbonatos de origen animal, vegetal o químico (Kleypas et al., 2006). Gracias a estos tres mecanismos, los océanos son considerados los principales sumideros de carbono, ya que absorben alrededor del 70% del dióxido de carbono atmosférico, del cual un 30% es antropogénico (Sabine et al., 2004); este servicio ambiental es fundamental para amortiguar el efecto invernadero que ha dado lugar al cambio global.

El dióxido de carbono entra como gas a la columna de agua, pero no permanece como tal en el mar, sino se presenta como ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) o en forma inestable como ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), formando parte del llamado “ciclo de los carbonatos” (Millero, 2006):



La ecuación citada es completamente reversible; es decir, cuando la concentración de  $\text{CO}_2$  es alta en el aire, el mar tiende a capturar el gas; mientras que si el  $\text{CO}_2$  es alto en el océano (por ejemplo, en áreas donde la respiración animal, vegetal o microbiana es alta), el compuesto tiende a volver a la atmósfera (Takahashi et al., 2002). De esta forma, hay regiones del mar que se consideran sumideros de carbono, mientras que otras representan fuentes de este gas (Sabine et al., 2004). Por todo lo anterior, el  $\text{CO}_2$  es importante en la química del agua de mar, ya que su concentración determina la dirección de la serie de reacciones de la ecuación 1, y secundariamente controla el pH, debido a la entrada o salida de protones al cambiar su forma iónica (Millero, 2006).

En el caso de los arrecifes coralinos existen dos procesos biogeoquímicos importantes y relacionados con el carbono: la fotosíntesis y la calcificación (Sheppard et al., 2009). Tomándolos en conjunto, el ecosistema arrecifal normalmente se comporta como un sitio de captura de carbono desde la atmósfera, ya que tanto los corales como otros miembros del ecosistema (moluscos, esponjas, etcétera) se consideran como hipercalcificadores, por generar cantidades masivas de carbonato no solo en el presente, sino también en tiempo geológico (Cohen y McConnaughey, 2003). Sin embargo, la misma acción de depositar carbonatos genera grandes cantidades de protones (ecuación 1), y ello hace que las condiciones locales en los arrecifes tiendan a desequilibrarse y volverse

relativamente más ácidas (Fabry et al., 2008). No obstante, dado que el carbono que depositan las especies arrecifales permanece fijo en sus esqueletos incluso después que el organismo muere, este proceso hace que los arrecifes sean sitios de secuestro permanente del carbono, lo que realza su relevancia en presencia del cambio global (Hoegh Guldberg et al., 2007).

En los esqueletos de los animales marinos, el carbonato de calcio biogénico se encuentra en dos formas minerales: calcita y aragonita, las cuales son químicamente análogas. La cantidad de carbonato de calcio depositado por los corales (en forma de aragonita, Calderón Aguilera et al., 2007) depende de las condiciones ambientales, ya que, en aguas cálidas, poco productivas y muy iluminadas, los esqueletos crecen más rápido y presentan una mayor tasa de crecimiento. Esto se debe a que los corales presentan simbiosis con dinoflagelados conocidos como “zooxantelas”, los cuales cambian el entorno químico presente en el interior de los pólipos y los ayudan a depositar el carbonato a gran velocidad (varios kilogramos por metro cuadrado cada año; Sheppard et al., 2009). Análisis estequiométricos han demostrado que, para que la calcificación se desarrolle mejor, se requiere un ambiente con baja acidez, lo que se detecta por medio de un indicador llamado “omega de aragonita”, el cual debe presentar valores de 3.0 o más, para que una zona sea adecuada para el desarrollo de los corales (Kleypas et al., 2006). Los valores de omega tienen una distribución latitudinal en el Pacífico americano: son bajos ( $< 3.0$ ) en zonas de surgencias (frías y productivas) como las islas Galápagos, el golfo de Panamá y el golfo de California, y altos en áreas cálidas como Costa Rica o el sur de México (Manzello, 2010).

En esta sección analizaremos un servicio ambiental clave que representa la tasa de depósito de carbono producto del crecimiento coralino en el arrecife de Cabo Pulmo. El arrecife cubre una superficie de 2.2 km<sup>2</sup> (0.9 km<sup>2</sup> corresponden al ecosistema presente en zonas someras, y 1.3 km<sup>2</sup> a los parches coralinos situados en zonas profundas o fuera de la bahía). Dicho sistema puede desarrollarse exitosamente gracias a la presencia de concentraciones bajas de nutrientes, temperatura relativamente alta ( $> 25^{\circ}\text{C}$  en promedio anual), y por la gran área de plataforma rocosa disponible para el asentamiento larval (Reyes Bonilla y López Pérez, 2009).

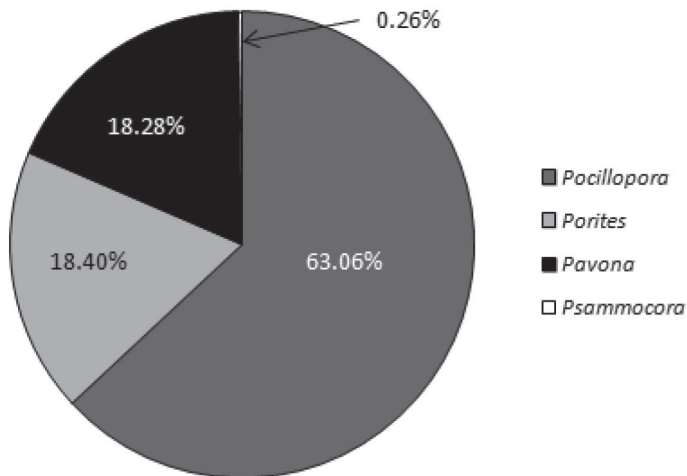
Los arrecifes coralinos, por estar constituidos por carbonato de calcio, eliminan una fracción del presupuesto del carbono en el océa-



no. Su relevancia se puede evaluar tomando en cuenta la velocidad de acumulación del  $\text{CaCO}_3$  biogénico por unidad de área en un periodo (normalmente, un año). En el caso de estudio, la cobertura de coral del arrecife de cabo Pulmo fue estimada en junio de 2012, cuando se realizaron 121 transectos de banda de 25 m de longitud por 1 m de ancho paralelos a la costa para estimar el porcentaje del fondo según el tipo de fondo: arena, roca, tapete algal, algas coralinas, macroalgas, coral vivo, coral muerto y otros organismos, como esponjas o gorgonáceos. Los resultados muestran que en el área muestreada el 25.7% es de cobertura coralina viva; el género dominante es *Pocillopora*, seguido de *Porites* y *Pavona*, y por último el género *Psammocora* (figura 1).

Figura 1

Porcentaje de cobertura coralina por género en el parque nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur, junio de 2012



El siguiente paso consiste en el cálculo de la producción potencial de carbonato, que se lleva a cabo multiplicando la tasa de crecimiento de cada coral (a escala de especie o género; en unidades de  $\text{cm/año}$ ), la densidad de su esqueleto ( $\text{g/cm}^3$ ) y su cobertura (porcentaje del fondo); el resultado presenta valores de kilogramos por metro cuadrado al año (Reyes Bonilla y Calderón Aguilera, 1999). Los datos de la tasa de crecimiento coralino y de la densidad esquelética para cada género de coral provienen del trabajo de Calderón Aguilera et al. (2007); a partir de

esta ecuación, la producción de carbonato biogénico que proviene del secuestro de carbono por el proceso de calcificación en el PNCP es de 6.80 kg CaCO<sub>3</sub>/m<sup>2</sup>/año (tabla 2).

La producción potencial de CaCO<sub>3</sub> calculada para Cabo Pulmo es muy similar a la citada en los noventa (Calderón Aguilera et al., 2007), y el valor se debe principalmente al efecto de la dominancia del género *Pocillopora*, el cual incluye cuatro especies presentes en la zona (Reyes Bonilla y López Pérez, 2009). Este tipo de corales forma colonias ramificadas con una alta tasa de crecimiento y calcificación (tabla 2), ya que ambos parámetros están altamente correlacionados (Manzello, 2010). Por otra parte, las especies masivas de los géneros *Porites* y *Pavona* son menos frecuentes en el arrecife, y además tienen una tasa de crecimiento inferior; consecuentemente, su producción de carbonato de calcio biogénico es reducida (tabla 1).

*Tabla 2*  
Cobertura coralina y producción de carbonatos  
por género de coral en el PNCP (2012)

<i>Genero del coral</i>	<i>Cobertura relativa (%)</i>	<i>Tasa de crecimiento (cm/año)</i>	<i>Densidad del esqueleto (g CaCO<sub>3</sub>/cm)</i>	<i>Producción (kg CaCO<sub>3</sub>/m<sup>2</sup>/año)</i>
Pocillopora	63.06	2.25	1.58	5.77
Porites	18.40	0.88	1.26	0.52
Pavona	18.28	0.84	1.23	0.50
Psammocora	0.26	0.50	1.50	0.01
Total	100.00			6.80

Cabe señalar que el proceso de formación de una estructura de carbonato por arrecifes está acompañado por una continua destrucción biológica (bioerosión); sin embargo, los valores de erosión calculados en Cabo Pulmo por Reyes Bonilla y Calderón Aguilera (1999) y por Herrera Escalante (2011) representan una pérdida de menos del 15% de la cantidad de carbonato depositado, por lo que la cifra real de secuestro de carbonatos debe de ser un poco menor a la citada en la tabla 2, pero muy cercana a ella.

Pasando a la evaluación del servicio ambiental que ofrece el crecimiento coralino, se requiere extrapolar los valores de la tabla 2 al área total donde se encuentran los corales (2.2 km<sup>2</sup>). Hecho el cálculo, puede

verse que la cantidad de carbonato de calcio producido por los escleractinios en el PNCP es de 14,960 toneladas por año, gracias en buena medida al incremento de cobertura coralina que se ha visto en los últimos diez años, ya que se ha registrado que en 2003 se tenía una cobertura coralina del 12% (Calderón Aguilera et al., 2007), y la cantidad de carbonatos depositados era inferior a la actual.

Algunos países han propuesto que se pague un impuesto sobre las emisiones de carbono como medidas de mitigación para frenar el cambio climático. Este precio se fijó en \$23.86 dólares americanos por tonelada de carbono, y se plantea un aumento gradual en el costo hasta el año 2015, cuando el mercado pueda establecer un precio fijo (Siriwardana et al., 2011). Ahora bien, de acuerdo con el estimado de precio por tonelada de carbono, y si consideramos la captura de carbono que se está realizando en Cabo Pulmo en forma de  $\text{CaCO}_3$  del esqueleto de los corales, el beneficio económico que esto representa para la sociedad es de \$356,945 dólares americanos (USD) por año.

Desafortunadamente, hay fuerte preocupación por el efecto de la acidificación de los océanos sobre los arrecifes coralinos, proceso que resulta en cambios negativos en la biodiversidad, modificaciones en las interacciones tróficas, y otro tipo de alteraciones en el ecosistema, que se traducen en una disminución en la habilidad de calcificar de los organismos (Fabry et al., 2008). Se estima que para el año 2050 el omega de aragonita de la zona de Cabo Pulmo habrá disminuido un 15% con respecto a los valores actuales, por las alteraciones en la química del mar (Reyes Bonilla et al., 2011), lo cual indica que el valor aquí estimado va en disminución. La acidificación no produce mortalidad coralina, pero trae como consecuencia esqueletos muy delgados, no aptos para mantener la estructura arrecifal y los bienes y servicios ambientales que este ecosistema puede proveer (Erez et al., 2010). No hay formas sencillas de adaptación a este tipo de cambios, excepto tratar de disminuir los impactos humanos directos sobre la estructura física arrecifal (evitar golpes con anclas, aletas, etcétera); sin embargo, estas deben ponerse en práctica a la brevedad, para prevenir daños irreversibles al sistema.

#### **4. Exportación de biomasa del ecosistema arrecifal Cabo Pulmo**

De las múltiples especies que se encuentran en los arrecifes, los peces son particularmente relevantes, porque ofrecen un conjunto de servi-

cios ambientales, incluyendo la regulación del flujo de alimento dentro de la red trófica (interacción que permite el transporte de nutrientes y materia). Además, sus labores como herbívoros y depredadores ayudan a mantener la calidad ecológica y el funcionamiento del sistema, su valor estético y sus funciones, gracias al control de algas y macrofitas (Holmlund y Hammer, 1999).

Una de las formas más eficientes para evaluar los servicios ambientales de los arrecifes de coral la ofrece la evaluación de la biomasa, un indicador biológico que representa la suma total del peso vivo de los organismos presentes en el sistema. Este volumen no es estable en el tiempo, sino aumenta en dependencia de fenómenos tales como la reproducción, inmigración y crecimiento corporal de organismos, o disminuye si hay eventos de perturbación que causen mortalidades elevadas (Russ y Alcalá, 1996). La biomasa puede sufrir procesos de degradación y convertirse en detritus, o bien exportarse a otros ecosistemas, en forma de emigración de organismos que nacieron o crecieron en un sitio y se mueven a otro, o como larvas que son transportadas por las corrientes de manera pasiva (Arreguín Sánchez et al., 2002).

La biomasa forma parte de los múltiples beneficios que un arrecife de coral puede proveer a las comunidades humanas que aprovechan sus servicios, ya que representa recursos económicos en forma de la pesca o el turismo, captura de carbono en forma de tejido algal, y subsidio de energía traducido en materia orgánica particulada y disuelta, y detritus (Moberg y Folke, 1999). Dichas ventajas no solo se hacen manifiestas en el arrecife mismo sino también en áreas cercanas, gracias a que una zona en buen estado de conservación provee individuos (adultos y juveniles) y energía a sus alrededores (Reyes Bonilla et al., 2012).

El flujo de biomasa dentro de ecosistemas marinos y entre ellos representa un proceso complejo, y para su análisis existe una herramienta metodológica de amplio uso, que son los modelos de la red trófica basados en un balance de masas. Estas representaciones matemáticas están basadas en el principio de la ley de la conservación de la materia, y parten de la suposición de que, dentro de un tiempo y un lugar determinados, la materia que entra a un sistema debe ser igual a la que sale de él. Lo anterior se traduce en que en un ecosistema no puede haber más consumo de biomasa que la que se produce, y ambos procesos se encuentran balanceados (Christensen y Pauly, 1992).

Para la construcción de estos modelos, las fronteras físicas y temporales que definen la función del ecosistema se definen en forma relati-

vamente arbitraria, pero siempre considerando principios ecológicos; en general, para el límite temporal se consideran usualmente periodos de un año, y el geográfico se define por la extensión del área de influencia del ecosistema bajo análisis (Díaz Uribe et al., 2007). Además, las simulaciones están basadas en la subdivisión del sistema en los llamados “grupos funcionales”, los cuales son agrupaciones de organismos que se definen por la función que desarrollan dentro del ecosistema y no por su relación filogenética (Blondel, 2003).

A la fecha, el programa computacional más utilizado para este tipo de modelos es Ecopath con Ecosim, el cual cuenta con más de cinco mil usuarios de más de 150 países (Ecopath, 2012). Los parámetros de entrada que utiliza el programa para la construcción de los modelos se presentan en la tabla 3, y cuatro de ellos son los más relevantes en la práctica: La biomasa del grupo funcional ( $B$ ), su relación producción/biomasa ( $P/B$ ), la cual equivale a la tasa de mortalidad total para las especies cuyo crecimiento individual puede describirse por el modelo de Von Bertalanffy (Ecopath, 2012), la relación consumo/biomasa ( $Q/B$ ) en cada grupo, y la matriz de dietas ( $DC_{ji}$ ) que representa las ligas como la materia se transporta entre la red trófica, en forma de alimento. Además, el modelo puede usarse para examinar el efecto de la pesca sobre elementos selectos del sistema ( $Y_i$ ), y para calcular la eficiencia ecotrófica del grupo funcional, que indica su capacidad de incorporación de la energía del alimento.

Tabla 3

Parámetros de entrada del modelo Ecopath de balance de masas

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>	<i>Unidad</i>
$B_i$	Biomasa del grupo funcional ( $i$ )	(t/km <sup>2</sup> )
$(P/B)_i$	Relación producción/biomasa para ( $i$ )	(año <sup>-1</sup> )
$(Q/B)_i$	Relación consumo/biomasa para el grupo funcional ( $i$ )	(año <sup>-1</sup> )
$DC_{ji}$	Composición de la dieta; fracción de la dieta del depredador ( $j$ ) con la que contribuye la presa ( $i$ )	(adimensional)
$Y_i$	Tasa de pesca total sobre el grupo funcional ( $i$ )	(t/km <sup>2</sup> /año)
$EE_i$	Eficiencia ecotrófica del grupo ( $i$ )	(adimensional)

Con el fin de estimar la biomasa exportada por el ecosistema arrecifal de Cabo Pulmo, se construyó un modelo de balance de masas siguiendo la metodología propuesta por Christensen y colaboradores

(2000). La información base consistió en la relación de la ocurrencia y abundancia de las especies observadas durante cuatro expediciones a Cabo Pulmo en 2011, en las que se estimó la cobertura coralina empleando transectos de banda de 20 x 1 m, y se hicieron censos de peces e invertebrados, mediante transectos de banda de 25 x 4, y 25 x 1 m, respectivamente. Además, se utilizaron datos publicados en revistas científicas y tesis para revisar las dietas y los niveles tróficos de las especies, y a partir de ahí se formaron 34 grupos funcionales que incorporan más de 100 especies de peces e invertebrados: 30 productores, tres productores primarios y un grupo que representa al detritus. La información detallada de las especies constituyentes de cada grupo puede revisarse en el trabajo de Frausto Illescas (2012). Se considera que la mayoría de los grupos funcionales incluidos en el modelo representa buena parte del ecosistema de Cabo Pulmo, de acuerdo con los registros que se tienen en el Programa de Manejo (Anónimo, 2006) y la tabla 1.

La biomasa de los grupos funcionales se estimó aplicando diferentes criterios; para la comunidad íctica se derivó del registro de tallas observadas en el campo aplicando la ecuación  $P = aL^b$ , donde  $P$  = peso,  $L$  = longitud, y  $a$  y  $b$  son parámetros obtenidos de la base de datos Fishbase (Froese y Pauly 2011). En el caso de equinodermos y moluscos, se calculó el promedio de la longitud total de los individuos observados, y se aplicó la ecuación talla-peso para obtener la biomasa, empleando datos obtenidos de diversas fuentes (citados en Frausto Illescas, 2012 y Ecopath, 2012). Por otra parte, para conocer la biomasa del fitoplankton se colectaron muestras de agua durante las salidas de campo a Cabo Pulmo con botellas Niskin, y su contenido era pasado por un filtro de membrana. Una vez en el laboratorio se pesaba el filtro, se filtraba un volumen de agua conocido fijado con lugol y por diferencia se estimaba la biomasa. Para el resto de los grupos se relacionó el número de individuos registrados en Cabo Pulmo con el peso promedio individual registrado en la literatura (Frausto, 2012). La biomasa se estimó por unidad de área y el modelo supone que está balanceada durante un periodo de un año. Los valores de las relaciones  $P/B$  y  $Q/B$  se obtuvieron a partir de la información publicada en otros modelos (Ecopath, 2012), y de Fishbase (Froese y Pauly, 2011).

La matriz de dietas es crucial, ya que permite construir en detalle la cadena trófica, al entrelazar al depredador con sus diferentes presas y así poder entender la dinámica del ecosistema (Christensen et al., 2005). En el presente modelo las dietas de los invertebrados se conformaron

con información disponible en literatura y en otros modelos (Ecopath, 2012), mientras que para la comunidad íctica los datos provienen de un estudio sobre la estructura y organización trófica de la comunidad íctica para el arrecife de los Frailes (Moreno Sánchez, 2009), zona colindante con el PNCP y situada hacia el sur de la bahía.

Dada su particular relevancia en este caso, es importante indicar que la exportación total ( $EX_i$ ) del grupo funcional ( $i$ ) fuera del ecosistema se calcula como:

$$EX_i = Y_i + E_i + BA_i$$

Donde:

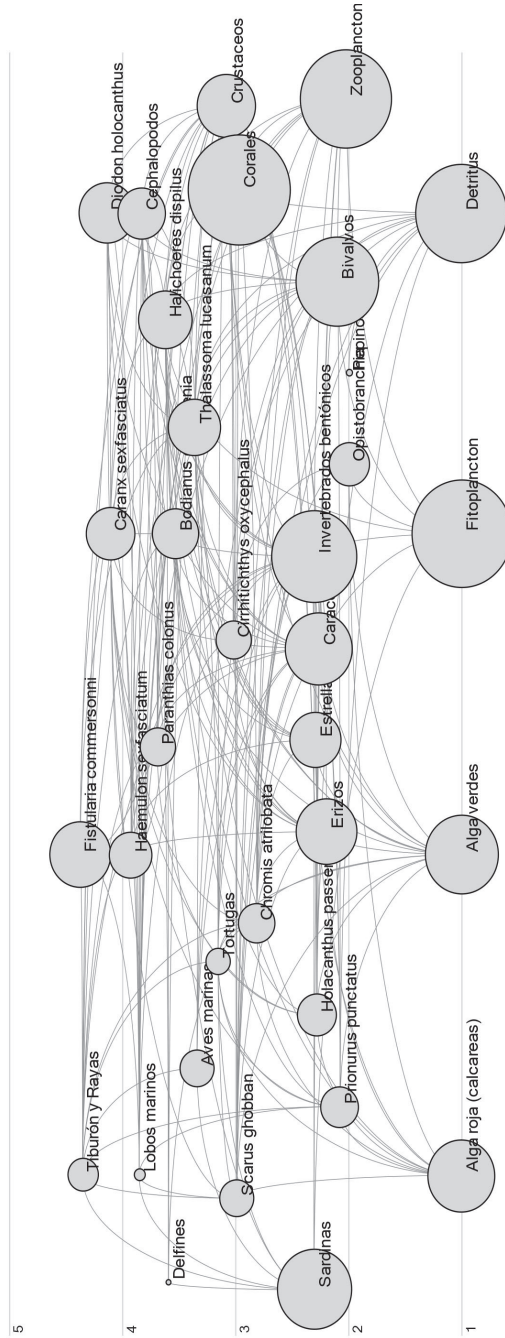
$Y_i$	Tasa de pesca total sobre el grupo funcional ( $i$ )
$E_i$	Tasa de migración neta (emigración-inmigración) para el grupo ( $i$ )
$BA_i$	Tasa de biomasa acumulada (crecimiento) para el grupo ( $i$ )

Todas las unidades se presentan como toneladas/km<sup>2</sup>/año. Además, como en el PNCP no se permite la pesca,  $Y_i = 0$ .

A manera de resultados del análisis, en la figura 2 se muestra un esquema de la trama trófica de Cabo Pulmo. Cada círculo representa un grupo funcional cuyo tamaño es proporcional a la biomasa del grupo y su ubicación en el eje vertical depende de su nivel trófico, desde 1 (productores primarios) hasta 4 o 5 (depredadores tope).

El modelo de balance de masas ofrece diversos estimadores tróficos (tabla 4) que ayudan a describir el funcionamiento de la cadena trófica. El primero es el flujo total de biomasa del sistema, que se emplea como estimador de su tamaño, ya que involucra todos los posibles rubros de distribución de biomasa (Ulanowicz, 1986). Para el caso de Cabo Pulmo, el valor de dicho flujo fue de 26,070 t/km<sup>2</sup>/año, del cual el 37% representa el consumo, el 21% es la biomasa que termina en forma de detritos en el arrecife, y el 20% se exporta hacia fuera del ecosistema. Este último volumen implica la cantidad de peso vivo en organismos que salen del parque nacional y pueden ser pescados en otras áreas, y corresponde a la cantidad de 5,344.4 t/km<sup>2</sup>/año. Esta cifra porcentual es comparable a la que se estima que exporta la bahía de La Paz (29%; Díaz Uribe et al., 2007), y casi trece veces superior a la que sale de la plataforma continental de la costa sonorenses (1.6%; Arreguín Sánchez et al., 2002).

Figura 2  
Modelo de red trófica del parque nacional Cabo Pulmo. Cada grupo funcional se ubica según el nivel trófico, y el tamaño de los círculos representa la biomasa de cada grupo





Finalmente, como no hay ningún tipo de pesca dentro de Cabo Pulmo, se infiere que la exportación de biomasa que genera esta zona contribuye a sostener las pesquerías de los ecosistemas aledaños. Hay que considerar que la mayoría de los peces solo pasan una parte de su vida utilizando los arrecifes como zona de crianza, alimentación o refugio, y migran a las zonas pelágicas del talud continental a completar su ciclo de vida (Mumby et al., 2004). Un claro ejemplo de ello son los peces carnívoros *Lutjanus viridis* (pargo amarillo) *Mycteroperca rosacea* (cabrilla sardinera) y *Caranx caninus* (jurel), que llegan al arrecife como juveniles para alimentarse de otros peces e invertebrados bentónicos, y al convertirse en adultos salen del arrecife para reproducirse (Robertson y Allen, 2006). Es durante esta fase de su ciclo de vida cuando son capturados en las zonas colindantes al arrecife, con lo que aportan una importante biomasa a las pesquerías de dichas localidades.

*Tabla 4*  
Principales descriptores del modelo trófico  
de cabo Pulmo (valores en t/km<sup>2</sup>/año)

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Porcentaje</i>
Consumo total	9,544	36.6%
Exportación total	5,330	20.4%
Flujo de respiración total	5,830	22.4%
Flujo de detritus total	5,366	20.6%
Suma total de flujos	26,070	100%

Según Costanza et al. (1998), uno de los servicios ambientales clave que proveen los arrecifes coralinos es la producción de alimento, en forma de peces y otras especies marinas, y dichos autores estiman ese servicio en \$220 dólares americanos por hectárea al año. En su porción marina, el parque nacional Cabo Pulmo abarca una extensión de poco más de 7,000 ha (Anónimo, 2006), de las cuales unas 220 ha corresponden al ecosistema arrecifal, la zona clave para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que Cabo Pulmo nos ofrece; el resto corresponde a sedimentos blandos, carbonatos y silicatos (Halfar et al.,). Tomando en cuenta estos valores, podría estimarse que el ecosistema arrecifal genera una biomasa con valor aproximado de \$48,400 USD/año, de la cual el 20% de la exportación equivale a \$9,680 USD/año. La cifra es notablemente baja si se compara con la expresada para el depósito de

carbono, por lo que se realizó una segunda estimación. En este caso, se obtuvo el valor promedio a pie de playa del kilogramo de pescado en la bahía de La Paz en 2012 (equivalente a 20 pesos), y se multiplicó por la biomasa exportada por el sistema (5,330 t/km<sup>2</sup>/año); considerando una paridad de trece pesos por dólar, el monto económico resultante de la exportación de peces del arrecife de Cabo Pulmo hacia sus alrededores es de \$177,100 USD al año. Cabe señalar que esta cantidad solo considera pesca comercial, aunque varias de las especies que sirven de agentes de exportación de biomasa (tiburones, atunes y otros pelágicos mayores), son elementos de la pesca deportiva, una labor notablemente más lucrativa y que, si se considerara, incrementaría el valor de la pesquería local.

De manera general, se puede concluir que, gracias a la alta diversidad de la comunidad íctica en Cabo Pulmo, el flujo local de materia y energía es muy eficiente. Un resultado de esta circunstancia es que el arrecife ofrece un conjunto de servicios ecosistémicos de alto valor no solo para los habitantes de la localidad, sino también para los residentes de los alrededores.

## **5. Beneficios económicos producto del turismo en el PNCP**

Como se ha indicado a lo largo de este texto, una de las formas más comunes para evaluar los servicios ambientales es el cálculo del beneficio económico que proveen, ya que de este modo la información es directamente comprensible por el público y se vuelve susceptible de ser analizada por diversos tipos de expertos (Moberg y Folke, 1998). Las valoraciones económicas en arrecifes de coral suelen realizarse sobre la base del costo de viaje, pero también a partir del gasto real que los visitantes llevan a cabo en los sitios elegidos (Pagiola et al., 2004).

Las administraciones de las áreas protegidas y los impulsores de programas de co-manejo entre las autoridades y las comunidades locales han abierto la discusión sobre la relevancia económica relativa de actividades potencialmente contradictorias, como la pesca y las actividades de buceo (Holmlund y Hammer, 1999 ) y, en general, se argumenta que el turismo ofrece una mejor opción para las comunidades y para el bienestar ambiental en general, ya que sus impactos son mucho menos intensos que los de la extracción de organismos, y además el recurso puede ser empleado repetidamente; el mismo individuo puede

representar un atractivo para múltiples buceadores deportivos, quienes invertirán recursos en la comunidad para poder observarlo y, una vez desarrollada la actividad, el animal puede ser fotografiado de nuevo por otras personas (Arizpe Covarrubias, 2004).

Dada la relevancia ecológica y económica del PNCP, surge la necesidad de hacer evaluaciones costo-beneficio de las acciones turísticas, ya que, aun siendo menos dañinas que la pesca, los visitantes a una zona infunden impactos ambientales, como daños a los corales provocados por buzos inexpertos, o contaminación puntual provocada por las embarcaciones (MPA, 2004). Considerando lo anterior, esta sección pretende ofrecer información sobre los servicios ecosistémicos del PNCP, llevando a cabo una valoración económica sencilla y directa del uso actual de la zona como atracción para el buceo autónomo y libre, y hacer una comparación del monto que se obtendría si las pesquerías comerciales fueran reactivadas. Esta información puede ser importante para el futuro del parque, ya que influencia la toma de decisiones futuras y el bienestar de las comunidades locales (Reyes Bonilla et al., 2012).

Para realizar este trabajo se llevaron a cabo diversas actividades. Primeramente, se evaluó la afluencia turística y los patrones mensuales y estacionales de la visitación, por medio de la consulta de bitácoras de los prestadores de servicios turísticos de buceo locales. Estos registros permitieron identificar el día, el número de personas atendidas y los sitios que fueron empleados para realizar inmersiones. Posteriormente, se construyó una base de datos en la cual se registró el número diario de personas que realizaron buceo autónomo (SCUBA) o libre (*snorkel*) en el parque nacional durante 2011. Los datos se dividieron por tipo de actividad, mes y sitio en el arrecife. También se calculó el total de visitantes para todo el PNCP en cada mes y de manera anual.

Para estimar el beneficio económico directo del buceo, se hicieron dos cálculos; primero se tomó en cuenta el número total de visitantes en 2011, la actividad que desarrollaron (inmersión libre o con equipo autónomo), el sitio y el mes de la actividad. Luego, estos valores se transformaron en cifras monetarias (en total, por mes y por localidad), y se multiplicó el número de usuarios por el costo promedio de cada actividad (\$90 USD buceo SCUBA y \$45 USD *snorkel*).

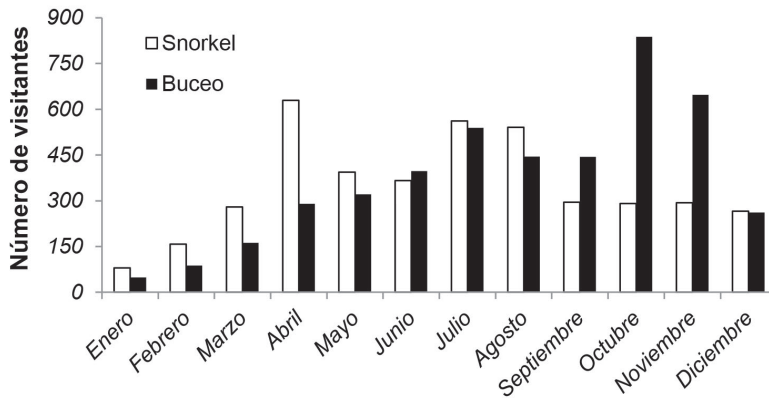
En segundo lugar, y con el objetivo de saber cuál podría ser el máximo potencial económico del PNCP atribuible al buceo, se realizó un análisis utilizando los valores máximos permisibles de buceadores por sitio (determinados en el estudio de capacidad de carga de actividades turís-

ticas en el parque efectuado por Álvarez del Castillo Cárdenas, 2012). El cálculo involucró el producto del número total de buzos permitidos por cada arrecife, por el costo promedio de la actividad (90 USD buceo SCUBA y 45 USD *snorkel*). De igual modo, se realizó el cálculo total de las divisas generadas por las actividades submarinísticas durante cada mes y por sitio.

Finalmente, a través de censos de organismos y de estimados de la biomasa de las especies pesqueras de tres familias (*Lutjanidae*, *Serranidae* y *Balistidae*) y cálculos de su valor económico a pie de playa, realizados con las técnicas descritas en la sección 3 de este documento, se evaluó el monto económico que arrojaría la reanudación de la pesca en el arrecife, si en este caso se extrajera el 30% de las poblaciones residentes.

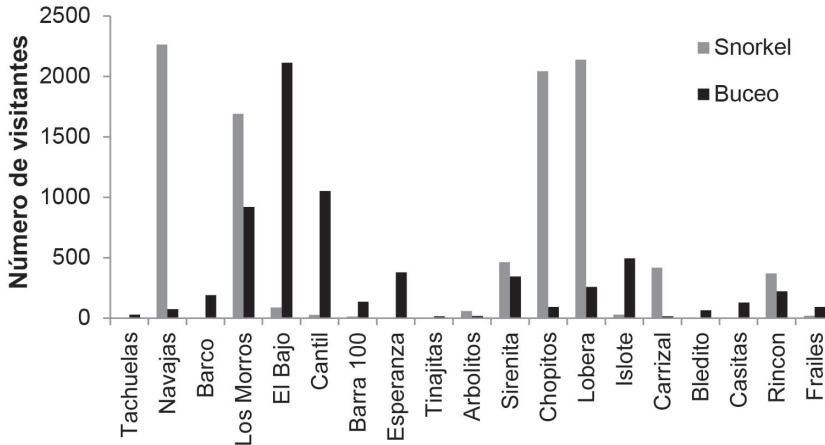
Figura 3

Fluctuación mensual del turismo submarino en el PNCP durante 2011



Los resultados del análisis (figura 3) muestran que el turismo submarino en el PNCP se desarrolla en todos los meses del año, y está compuesto por buzos nacionales y extranjeros. Durante el año 2011, el parque recibió la visita de 8,638 visitantes que realizaron actividades de buceo autónomo o libre en cantidades similares (4,156 personas practicando *snorkel* y 4,482 buceo autónomo). Los meses de mayor actividad son los de verano-otoño, y se observa una notable baja entre diciembre y marzo, como consecuencia de la presencia de los vientos del norte en esa temporada.

Figura 4  
 Visitación turística por buceadores  
 en cada arrecife del PNCP durante 2011



Por otra parte, la intensidad de uso de los arrecifes varía entre sitios. La figura 4 muestra que el buceo autónomo se concentra en cierta zona del parque nacional, situada al norte de la bahía de Cabo Pulmo, mientras que las actividades de buceo libre se realizan en la sección centro-sur. Los sitios más visitados para buceo autónomo son El Bajo, El Cantil y Los Morros, que se caracterizan por profundidades superiores a los 9 m y por tener alta diversidad y abundancia de especies arrecifales (Aburto Oropeza et al., 2011). Por otra parte, los sitios más usados para el *snorkel* fueron Las Navajas, Los Chopitos y La Lobera, todos muy someros. Los dos primeros se caracterizan por permitir al visitante admirar las formaciones de roca y coral, junto con abundantes peces e invertebrados asociados, pero el tercero tiene como gran atractivo la presencia de lobos marinos juveniles (*Zalophus californianus*) durante junio y septiembre; posteriormente los animales migran al norte o hacia bahía Magdalena, y como consecuencia la zona es poco visitada por el turismo en los demás meses.

Otra observación importante es que la localidad de Los Morros fue una de las más utilizadas tanto para *snorkel* como para buceo SCUBA (figura 4). Lo anterior puede deberse a la ocurrencia frecuente cerca de la superficie de cardúmenes de jureles y la presencia de otras especies pelágicas, como mantarrayas, mientras que hacia la profundidad se

encuentra una de las zonas más reconocidas del arrecife, donde se concentran los organismos de mayor tamaño (Aburto Oropeza et al., 2011).

Entrando a la parte de la evaluación económica del servicio ambiental que provee el arrecife a los buceadores, debe mencionarse que el Programa de Manejo del parque nacional Cabo Pulmo (Anónimo, 2006) regula las actividades y prohíbe la actividad pesquera comercial dentro del perímetro del área protegida. Esta condición permitió el aumento y la recuperación de diferentes especies de interés comercial de pesca que se aprovechaban en el sitio antes de su creación, y en especial de grandes depredadores como cabrillas, pargos y tiburones. En ese momento se generó una gran oportunidad para el desarrollo de actividades de aprovechamiento no extractivo para los habitantes de la comunidad de cabo Pulmo, que pasaron de ser pescadores comerciales a operadores de servicios turísticos (Arizpe Covarrubias, 2004).

Según nuestros cálculos, basados en el número de visitantes y el costo por viaje de buceo, la derrama económica por actividades submarinísticas en cabo Pulmo fue de \$590,400 USD en el año 2011 (tabla 5). La actividad de buceo fue la que mayor derrama económica dejó (\$403,380 USD; 68% del total), y los meses de octubre y noviembre fueron los de mayor afluencia turística para actividades de buceo, y ganancia económica (figura 3). Por otra parte, las actividades de *snorkel* generaron una entrada de \$187,020, y los meses de mayor derrama fueron de abril a agosto. Finalmente, cabo Pulmo cuenta con diecinueve sitios de buceo y quince de *snorkel*; de ellos, los que dejaron una mayor derrama económica (tabla 5) fueron El Bajo (\$95,085 USD), el Cantil (\$47,295 USD) y Los Morros (\$41,355 USD). En el caso de *snorkel* se incluye La Lobera (\$21,955 USD) y Chopitos (\$20,951 USD).

En la tabla 6 se muestra el cálculo de la derrama económica potencial de Cabo Pulmo en función del valor máximo de capacidad de carga obtenido por Álvarez del Castillo Cárdenas (2012), en diez sitios seleccionados por la administración del PNCP, y se compara con las cifras de 2011. Como se ve, la ganancia actual por buceo representa un 1% del potencial, si el parque se usara a su máxima capacidad aceptable. Es improbable que a corto o mediano plazo exista la infraestructura para poder llevar a cabo las actividades de buceo a los niveles máximos que maneja el estimador de capacidad de carga; sin embargo, es claro que el beneficio económico del buceo se irá incrementando en el futuro.

*Tabla 5*  
Divisas generadas por las actividades de buceo autónomo (SCUBA) y libre (*snorkel*) en el PNCP durante 2011 (valores en USD)

<i>Sitios</i>	<i>Ganancia snorkel</i>	<i>Ganancia SCUBA</i>	<i>Ganancia total</i>	<i>Meses</i>	<i>Ganancia snorkel</i>	<i>Ganancia SCUBA</i>
Tachuelas	\$0	\$1,305	\$1,305	Enero	\$3,600	\$4,410
Navajas	\$23,206	\$3,375	\$26,581	Febrero	\$7,110	\$7,920
Barco	\$0	\$8 505	\$8,505	Marzo	\$12,600	\$14,580
Los Morros	\$17,343	\$41,355	\$58,698	Abril	\$28,305	\$26,100
El Bajo	\$902	\$95,085	\$95,987	Mayo	\$17,730	\$28,890
Cantil	\$267	\$47,295	\$47,562	Junio	\$16,470	\$35,730
El 100	\$133	\$6,075	\$6,208	Julio	\$25,290	\$48,510
Esperanza	\$0	\$17,010	\$17,010	Agosto	\$24,345	\$40,050
Tinajitas	\$21	\$720	\$741	Septiembre	\$13,275	\$39,960
Arbolitos	\$595	\$765	\$1,360	Octubre	\$13,095	\$75,420
Sirenita	\$4,746	\$15,480	\$20,226	Noviembre	\$13,230	\$58,230
Chopitos	\$20,951	\$4,140	\$25,091	Diciembre	\$11,970	\$23,580
Lobera	\$21,935	\$11,610	\$33,545	Total	\$187,020	\$403,380
Islote	\$298	\$22,230	\$22,528			
Carrizal	\$4,285	\$630	\$4,915	Gran total anual		\$590,400
Bledito	\$62	\$2,925	\$2,987			
Casitas	\$0	\$5,805	\$5,805			
Rincón	\$3,782	\$10,035	\$13,817			
Frailles	\$205	\$4,185	\$4,390			

Para concluir la sección, se hizo un estimado simulado de la ganancia que existiría si se hiciera aprovechamiento extractivo dentro de Cabo Pulmo en la actualidad, sobre la base de la abundancia y la biomasa de las especies comerciales clave (familias *Serranidae*, *Lutjanidae* y *Balistidae*), y considerando que la pesca no debería eliminar más allá del 30% de la biomasa en pie. Los resultados muestran que la ganancia atribuible al potencial pesquero en los diez arrecifes citados en la tabla 6 sería de \$176 USD por hectárea, teniendo el mayor valor económico El Bajo (\$319 USD/ha) y los Chopitos (\$271 USD/ha). Extrapolando este promedio al área arrecifal total del PNCP, de 220 ha, el monto total de la extracción del 30% de los individuos sería de \$11,616 USD. Es claro que comparando esta cifra con la del beneficio económico actual del sitio

gracias al buceo (\$590,400 USD; tabla 5), resulta mucho mejor para la comunidad seguir efectuando sus actividades actuales.

*Tabla 6*

Valoración económica anual en diez localidades en el PNCP, según ganancia potencial por actividades de buceo autónomo y libre, según la capacidad de carga turística del parque, valor económico actual de turismo de buceo, y valor pesquero potencial  
Montos en USD

<i>Sitio</i>	<i>Ganancia potencial</i>	<i>Ganancia actual</i>
Tachuelas	\$235,446	\$1,305
Los Morros	\$1,072,838	\$58,698
El Bajo	\$1,154,661	\$95,987
El Cantil	\$466,958	\$47,562
El Cien	\$6,770,337	\$6,208
Las Tinajitas	\$296,183	\$741
Los Arbolitos	\$850,533	\$1,360
Los Chopitos	\$2,398,646	\$25,091
Las Casitas	\$670,477	\$5,805
Los Frailes	\$1,679,535	\$4,390
Total	\$15,595,614	\$245,842

Cabo Pulmo es una de las áreas naturales mejor conservadas de México, y esto se manifiesta en la gran riqueza específica y el tamaño de los organismos. Estas mismas características generan una derrama económica turística importante para la región, y el análisis aquí realizado da una clara explicación de por qué la comunidad local decidió transformar su actividad económica extractiva en una no extractiva. Finalmente, se puede decir que, debido al aumento notable en el número de visitantes al arrecife resultante de la fama internacional que obtuvo debido a la lucha para evitar el establecimiento de un complejo turístico de alto impacto, es de esperar que el beneficio económico resultante del buceo se vea incrementado rápidamente en el futuro inmediato.



## **6. Conclusión**

A partir de los tres análisis realizados sobre los montos económicos que generan algunos servicios ambientales que provee el arrecife de cabo Pulmo (secuestro de carbono atmosférico, exportación pesquera y ganancia directa por turismo), se puede estimar que este ecosistema está aportando a la sociedad un monto mínimo de 1.1 millones de dólares cada año. Este valor es relativamente bajo, pero hay que considerar que representa una fuerte subestimación del real. De inicio, el estudio mismo no consideró otros factores que aumentan el valor del arrecife (depósito de carbonatos por moluscos, esponjas y otros organismos; ganancias por turismo a negocios que no tienen su base en la localidad). Además, existe una plétora de beneficios que el PNCP ofrece, que no fueron cuantificados (la pesca deportiva, la aportación de arena de playa, el gasto por visitante en alimentación y estancia, etcétera). En resumen, creemos que la cifra aquí presentada podría al menos triplicarse, y que además es posible que se eleve sensiblemente en el futuro cercano.

## **Agradecimientos**

El estudio se realizó con fondos de PROMOBÍ-CONANP (a HRB) y SEMARNAT-CONACYT (registro 023390 a LECA) y el apoyo de las organizaciones civiles Amigos para la Conservación de Cabo Pulmo, Pronatura Noroeste y Niparáj. XGMS agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Politécnico Nacional por el soporte económico a través del apoyo de retención por excelencia (clave 10-02-147945), y varios autores (AACC, FJFRM, TF, CONL, MCMT, DPR) gozaron becas de maestría de CONACYT durante la preparación del documento (213427, 267156, 290628, 391355, 462583).

## **Bibliografía**

Aburto Oropeza, O.; Erisman, B.; Galland, G. R.; Mascareñas Osorio, I.; Sala, E. y E. Excurra (2011), "Large Recovery of Fish Biomass in a No-take Marine Reserve", *PLoS ONE* 6(8), e23601. doi:10.1371/

- Álvarez del Castillo Cárdenas, P. A. (2012), “Estimación de la capacidad de carga para buceo en el parque nacional Cabo Pulmo, Baja California Sur”, tesis de maestría, Centro Interdisciplinaria de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.
- Anónimo (2006), *Programa de conservación y manejo: Parque nacional de Cabo Pulmo*, México, Comisión Nacional de Areas Protegidas.
- Arizpe Covarrubias, O. (2004), “El turismo como alternativa a la pesca en el manejo costero. Caso cabo Pulmo, golfo de California, en E. Rivera Arriaga, G. J. Villalobos Zapata, I. Azuz Adeath y F. Rosado May (ed.), *El manejo costero en México*, Ciudad del Carmen, EPOMEX, pp. 573-588.
- Arreguín-Sánchez, F.; Arcos, E., y E.A.Chávez (2002), “Flows of Biomass and Structure in an Exploited Benthic Ecosystem in the Gulf of California, Mexico, *Ecological Modelling*, 156, pp. 167-183.
- Bastida-Zavala, J. R. (1995), “Poliquetos (Annelida: Polychaeta) del arrecife coralino de Cabo Pulmo-Los Frailes, Baja California Sur, México”, *Revista de Zoología*, 6, pp. 9-29.
- Blondel, J. (2003), “Guilds or Functional Groups: Does it Matter?”, *Oikos*, 100, pp. 223-231.
- Brusca, R. C. Invertebrate Database of the Gulf of California. Disponible en: <http://www.desertmuseum.org/center/seaofcortez/database.php>.
- Brusca, R. C. y D. A. Thomson (1975), “Pulmo Reef: The only ‘Coral Reef’ in the Gulf of California”, *Ciencias Marinas*, 1, pp. 37-53.
- Calderón Aguilera, L. E., Reyes Bonilla, H. y J. D. Carriquiry (2007), “El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano”, en B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola Castro (ed.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*, México, SEMARNAT-INECICSE, pp. 215-226.
- Christensen, V. y D. Pauly (1992), “ECOPATH II — a Software for Balancing Steady-state Ecosystem Models and Calculating Network Characteristics, *Ecological Modelling*, 61, pp. 69-185.
- Cintra-Buenrostro, C. E.; Reyes-Bonilla, H. y O. Arizpe Covarrubias (1998), “Los equinodermos (Echinodermata) del arrecife de cabo Pulmo, Pacífico de México”, *Revista de Biología Tropical*, 46, pp. 341-344.
- Cohen A. L. y T. A. McConnaughey (2003), “Geochemical Perspectives on Coral Mineralization”, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54, pp. 151-187.
- Costanza, R.; D’Arge, R.; De Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O’Neill, R.V.; Paruelo, J. Raskin, R. G.; Sutton, P. y M. van den Belt (1998), “The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital”, *Ecological Economics*, 25, pp. 3-15.
- “Ecopath” (2012), *Ecopath with Ecosim*. Disponible en: [www.ecopath.org](http://www.ecopath.org).

- Erez, J.; Reynaud, S.; Silvermanm J.; Schneider, K. y D. Allemand (2011), "Coral Calcification under Ocean Acidification and Global Change", en Z. Dubinsky y N. Stambler (ed.), *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, Berlin, Springer, pp. 155-176.
- Fabry, V. J.; Seibel, B. A.; Feely R. A. y J. C. Orr (2008), "Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes. *ICES Journal of Marine Science*, 65, pp. 414-432.
- Frausto Illescas, T. C. (2012), "Simulación del efecto del turismo subacuático sobre el ecosistema arrecifal de cabo Pulmo, Baja California Sur, mediante un modelo trófico", tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Froese, R. y D. Pauly (2011), *FishBase*, [www.fishbase.org](http://www.fishbase.org).
- Díaz Uribe, J. G.; Arreguín Sánchez, F. y M. A. Cisneros Mata (2007), Multispecies perspective for Small-scale Fisheries Management: A Trophic Analysis of La Paz Bay in the Gulf of California, Mexico, *Ecological Modelling*, 201, pp. 205-222.
- García Madrigal, M. S. (1999), "Anomuros (Anomura) del arrecife de cabo Pulmo-Los Frailes y alrededores, golfo de California, *Revista de Biología Tropical*, 47, pp. 923-928.
- García Madrigal, M. S. y J. R. Bastida Zavala (1999), "Cangrejos braquiuros (Brachyura) del arrecife de cabo Pulmo-Los Frailes y alrededores, golfo de California, México", *Revista de Biología Tropical* 47, pp. 123-132.
- Gámez, A. E. (ed.) (2008), *Turismo y sustentabilidad en cabo Pulmo, Baja California Sur*, San Diego, San Diego State University.
- Herrera Escalante, T. (2011), "Potencial bioerosivo de *Diadema mexicanum* (Echinodermata: Echinoidea) en cuatro arrecifes del Pacífico mexicano", tesis doctoral, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.
- Hoegh Guldberg, O.; Mumby, P. J.; Hooten, A. J.; Steneck, R. S.; Greenfield, P., Gómez, E.; Harvell, C. D.; Sale, P. F.; Edwards, A. J.; Caldeira, K.; Knowlton, N.; Eakin, C. M.; Iglesias Prieto, R.; Muthiga, N.; Bradbury, R. H.; Dubi, A. y M. E. Hatziohos (2007), "Coral Reefs under Rapid Climate Change and Ocean Acidification", *Science*, 318, pp. 1737-1742.
- Holmlund, C. M. y M. Hammer (1999), "Ecosystem Services Generated by Fish Populations", *Ecological Economics*, 29, pp. 253-268.
- Kleypas, J. A.; Feely, R. A.; Fabry, V. J.; Langdon, C.; Sabine, C. L. y L. L. Robbins (2006), *Impacts of Ocean Acidification on Coral Reefs and other Marine Calcifiers, A Guide for Future Research*, Baltimore, NSF-NOAA-USGS.
- Kleypas, J. A.; McManus, J. W. y L. A. B. Méñez (1999), "Environmental Limits to Coral Reef Development: Where do we draw the Line?", *American Zoologist*, 39, pp. 146-159.

- Magurran, A. E. (2011), "Measuring Biological Diversity in Time (and Space)", en A. E. Magurran y B. J. McGill (ed.), *Biological Diversity*, Oxford, Oxford University Press, pp. 85-96.
- Manzello, D. P. (2010), "Coral Growth with Thermal Stress and Ocean Acidification: Lessons from the Eastern Tropical Pacific", *Coral Reefs*, 29, pp. 749-758.
- Mateo Cid, L. E.; Mendoza González, A. C.; Galicia García, C. y L. Huerta Múzquiz (2000), "Contribución al estudio de las algas marinas bentónicas de punta Arena y Cabo Pulmo, Baja California Sur, México", *Acta Botánica Mexicana*, 52, pp. 55-73.
- McField, M. y P. Kramer (2007), *Healthy Reefs for Healthy People*, Washington, Smithsonian Press.
- Millero, F. (2006), *Chemical Oceanography*, Miami, CRC Press.
- Moberg, F. y C. Folke (1999), "Ecological Goods and Services of Coral Reef Ecosystems", *Ecological Economics*, 29, pp. 215-233.
- Moreno Sánchez, X. G. (2009), "Estructura y organización trófica de la ictiofauna del arrecife de Los Frailes, Baja California Sur, México" tesis doctoral, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.
- MPA Staff (2004), "Assessing the Carrying Capacity of MPAs: How many Visitors can your MPA hold?", *MPA News*, 6(2), pp. 1-4.
- Mumby, P. J.; Edwards, A. J.; Arias González, J. E.; Lindeman, K. C.; Blackwell, P. G.; Gall, A.; Gorczyńska, M. I.; Harborne, A. R.; Pescod, C. L.; Renken, H.; Wabnitz, C. C. C. y G. Llewellyn (2004), "Mangroves enhance the Biomass of Coral Reef Fish in the Caribbean" *Nature*, 427, pp. 533-536.
- Pagiola, S.; Von Ritter, K. y J. Bishop (2004), *How much is an Ecosystem Worth?*, Gland, IUCN-TNC-World Bank.
- Perrings, C.; Baumgartner, S.; Brock, W. A.; Chopra, K.; Conte, M.; Costello, C.; Duraiappah, A.; Kinzig, A. P.; Pascual, U.; Polasky, S.; Tschirhart, J. y A. Xepapadeas (2009), "The Economics of Biodiversity and Ecosystem Services", en S. Naeem, D. E. Bunker, A. Hector, M. Loreau, y C. Perrings (ed.), *Biodiversity, ecosystem functioning and human wellbeing*, Oxford, Oxford University Press, pp. 230-247.
- Reyes Bonilla, H. y L. E. Calderón Aguilera (1999), "Population Density, Distribution and Consumption Rates of three Corallivores at Cabo Pulmo Reef, Gulf of California, Mexico", *PSNZI Marine Ecology*, 20, pp. 347-357.
- Reyes Bonilla, H.; Sinsal Duarte, F. O. Arizpe Covarrubias (1997), "Gorgonias y corales pétreos (Anthozoa: Gorgonacea y Scleractinia) de Cabo Pulmo, México", *Revista de Biología Tropical*, 45, pp. 1439-1443.
- Reyes Bonilla, H.; Walther Mendoza, M. y G. Ramírez Ortiz (2012), "Biodiversidad marina y turismo ecológico en áreas naturales protegidas de México", en R. Ibáñez y A. Ivanova (ed.), *Medio Ambiente y política*

- turística en México, t. I, *Ecología, biodiversidad y desarrollo turístico*, México, SEMARNAT-INE-UABCS, pp. 135-148.
- Reyes Bonilla, H. y R. A. López Pérez (2009), “Corals and Coral-reef Communities in the Gulf of California, en M. E. Johnson y J. Ledesma Vásquez (ed.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California: Past and Present*, Tucson, University of Arizona Press, pp 211-224.
- Reyes Bonilla, H.; Mozqueda Torres, M. C.; Calderón Aguilera, L. E. y G. Díaz Erales (2011), “La acidificación del océano y los arrecifes del Pacífico mexicano”, *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México*, 3(73), p. 1.
- Robertson D. R. y G. R. Allen (2006), *Shore Fishes of the Tropical Eastern Pacific*, CD-ROM, Smithsonian Tropical Research Institution.
- Russ, G.R. y A. C. Alcala (1996). “Do Marine Reserves export Adult Fish Biomass? Evidence from Apo Island, Central Philippines”, *Marine Ecology Progress Series*, 132, pp. 1-9.
- Sabine, C. L.; Feely, R. A.; Gruber, N.; Key, R. M.; Lee, K.; Bullister, J. L.; Wanninkhof, R.; Wong, C. S.; Wallace, D. W. R.; Tilbrook, B.; Millero, F. J.; Peng, T. H.; Kozyr, A.; Ono, T. y A. F. Rios (2004), “The Oceanic Sink for Anthropogenic CO<sub>2</sub>”, *Science*, 305, pp. 367-371.
- Sheppard, C. R. C.; Davy, S. K. y G.M Pilling, (2009), *The Biology of Coral Reefs*, Oxford, Oxford University Press.
- Siriwardana, M.; Meng, S. y J. McNeill (2011), “The Impact of a Carbon Tax on the Australian Economy: Results from a CGE Model”, *Business, Economics and Public Policy Working Papers*, University of New England.
- Steinbeck, J. y E. F. Ricketts (1941); *Viking: Sea of Cortez*.
- Takahashi, T.; Sutherland, S. C.; Sweeney, C.; Poisson, A.; Metzl, N.; Tilbrook, B.; Bates, N.; Wanninkhof, R.; Feely, R. A.; Sabine, C.; Olafsson, J. y Y. Nojiri (2002), “Global Sea–air CO<sub>2</sub> flux Based on Climatological Surface Ocean pCO<sub>2</sub>, and Seasonal Biological and Temperature Effects, *Deep Sea Research*, Part II, 49, pp. 1601-1622.
- Vicencio Aguilar, M. D. (1998), “Estructura de la comunidad de molusco de cabo Pulmo, Baja California Sur, México”, tesis de Maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Instituto Politécnico Nacional.
- Villarreal Cavazos, A.; Reyes Bonilla, H.; Bermúdez Almada, B. y O Arizpe Covarrubias (2000), “Los peces del arrecife de cabo Pulmo, golfo de California, México: lista sistemática y aspectos de abundancia y biogeografía”, *Revista de Biología Tropical*, 48, pp. 413-424.
- Wallace, K. J. (2007). “Classification of Ecosystem Services: Problems and Solutions, *Biological Conservation*, 139, pp. 235-246.
- Veron, J. E. N. (2000), *Corals of the World*, Townsville, Australian Institute of Marine Science.

