

Morelia, Michoacán a 26 de julio de 2016

**Dr. Reginaldo Durazo**

Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California campus Ensenada (UABC)

P R E S E N T E

Estimado Dr. Durazo,

A través de este medio le informo con mucho gusto que el libro *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* fue publicado recientemente en formato digital (ISBN: 978-607-02-8014-6) y en formato impreso (ISBN: 978-607-02-8015-3). A nombre de los editores, agradezco enormemente su labor como **coautor del capítulo “Herramientas y estrategias para el estudio y manejo de los ecosistemas y su biodiversidad”**, desempeñando con entusiasmo y compromiso las siguientes actividades: la construcción de un equipo de trabajo; el co-diseño, con todos los coordinadores de sección, del índice del capítulo; la revisión de los materiales bibliográficos adecuados para su sección; la revisión, en reiteradas ocasiones, de los contenidos de cada sección; así como contribución a los contenidos del glosario.

El libro completo en su formato electrónico y el capítulo del cual es usted coordinador, podrán ser consultados en el sitio web de la Red de Socioecosistemas y Sustentabilidad (<http://redsocioecos.org/libroecored/>), así como en el portal ResearchGate ([https://www.researchgate.net/profile/Red\\_De\\_Socioecosistemas\\_Y\\_Sustentabilidad](https://www.researchgate.net/profile/Red_De_Socioecosistemas_Y_Sustentabilidad)).

Cabe señalar que la forma correcta de citar el libro es:

Balvanera, Patricia, Jesús Ernesto Arias-González, Ricardo Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitter-Soto (eds.). 2016. *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 441 pp, ISBN: 978-607-02-8014-6.

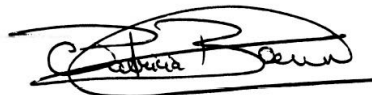
Y la forma correcta de citar el capítulo es:

González Solís, D., Quiñonez Piñón, R., Luján Molina, V.H., Arriola Padilla, V., Barba Macías, E., Cortés Calva, P., Elizondo, C., Franco Hernández, M.O., Iñiguez Dávalos, L.I., Jiménez Badillo, M. de L., Ortega Rubio, A., Ponce Mendoza, A., Rodríguez Quiroz, G., Sosa Ramírez, J., Valadez Cruz, F., Vázquez Murrieta, M.S., Aguirre León, A., Almeida-Leñero, L., Álvarez Vela, A., Amezcua Allieri, M.A., Ángeles Álvarez, G., Solís Cámara, A.B., Calva Benítez, L.G., Castro Pérez, J.M., Cervantes Peredo, L., Chagoya Fuentes, J.L., Díaz Castañeda, V., Díaz Ruiz, S., Durazo, R., Estrada Loreto, F., García Franco, J.G., González Martínez, T.M., Gutiérrez Mendieta, F.J., Ibañez Aguirre, A.L., Ibarra Sánchez, C.L., Martínez López, A., Medina Quej, A., Montoya Bello, L., Moreno Casasola, P., Mosqueda Cabrera, M.Á., Núñez Lara, E., Orellana Lanza, R., Pacheco Ruiz, I., Padilla Vargas, P., Pérez Miranda, R., Poblano Amparán, J.F., Salas de León, D.A., Sánchez Velasco, L., Santos Barrera, G., Vázquez Hurtado, G. & Velázquez Angulo, G. (2016) *Herramientas y estrategias para el estudio y la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad*. En *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* (eds P. Balvanera, J.E. Arias-González, R. Rodríguez-Estrella, L. Almeida-Leñero & J.J. Schmitter-Soto), pp. 341–436. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, ISBN: 978-607-02-8014-6.

Finalmente, le hacemos una cordial invitación a darle difusión a esta publicación en todos los medios y foros que considere pertinentes.

Sin más por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle saludos afectuosos y me pongo a su disposición para resolver cualquier duda y/o ampliar la información.

A T E N T A M E N T E



**Dra. Patricia Balvanera Levy**  
Editora

Responsable Técnico de la Red Temática de Socioecosistemas y Sustentabilidad  
Investigadora Titular “C” T.C. IIES-UNAM



# **Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México**

**Editores:** Patricia Balvanera, Jesús Ernesto Arias-González, Ricardo Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero y Juan J. Schmitter-Soto

#### **Editores**

Patricia Balvanera<sup>1</sup>

Jesús Ernesto Arias-González<sup>2</sup>

Ricardo Rodríguez-Estrella<sup>3</sup>

Lucía Almeida-Leñero<sup>4</sup>

Juan J. Schmitter-Soto<sup>5</sup>

#### **Apoyo técnico a los editores**

Olga Nelly Rodríguez Peña

Iván Alejandro Ortiz Rodríguez

#### **Edición, producción y diseño**

PRODUCCIÓN EDICIÓN Y COORDINACIÓN EDITORIAL: Masahiro Tanikawa Ishiwara

DISEÑO EDITORIAL E INFOGRAFÍAS: Leonardo Vázquez Conde

#### **Fotografía de portada e interiores**

© Masahiro Tanikawa Ishiwara

ISBN: 978-607-02-8014-6

Impreso en México

#### **Forma de citar**

Balvanera, Patricia, Jesús Ernesto Arias-González, Ricardo Rodríguez-Estrella, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitter-Soto (eds.). 2016. *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, 441 pp.

<sup>1</sup> Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

<sup>2</sup> Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos, Departamento de Recursos del Mar, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional (IPN)-Unidad Mérida.

<sup>3</sup> Laboratorio Análisis Espacial, Ecología y Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.

<sup>4</sup> Laboratorio de Ecosistemas de Montaña, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, UNAM.

<sup>5</sup> Departamento de Sistemática y Ecología Acuática, El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)-Unidad Chetumal

# Agradecimientos

## Financiamiento

*Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México* se inició en el marco de la Red Temática Ecosistemas (Ecored), financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) entre 2008 y 2011, con el apoyo a reuniones de trabajo y a la revisión sistemática de información. La revisión, la edición, el diseño editorial y la impresión física y electrónica fueron apoyados por la Red de Socioecosistemas y Sustentabilidad (RedSocioecoS) financiada por el Conacyt en 2014 y 2015 (Conacyt U0003-2014-2-244258, Conacyt U0003-2015-1- 251480).



# Contenido

	<b>Introducción general</b>	15
	<i>Patricia Balvanera, Lucía Almeida-Leñero, Juan J. Schmitter-Soto, Ricardo Rodríguez-Estrella y Jesús Ernesto Arias-González</i>	
<b>1</b>	<b>Cambio climático: contexto histórico, paleoecológico y paleoclimático. Tendencias actuales y perspectivas</b>	25
	<b>Coordinador de capítulo:</b> <i>Gerald A. Islebe</i>	
<b>2</b>	<b>Impacto de las actividades humanas en la biodiversidad y en los ecosistemas</b>	57
	<b>Coordinadores de capítulo:</b> <i>Ricardo Rodríguez-Estrella, Julieta Benítez Malvido, Ek del Val de Gortari y Georgina Santos Barrera</i>	
<b>3</b>	<b>Cambios en la biodiversidad y sus consecuencias en el funcionamiento de los ecosistemas y sus servicios</b>	191
	<b>Coordinadores de capítulo:</b> <i>Jesús Ernesto Arias-González, Olga Nelly Rodríguez Peña, Lucía Almeida-Leñero, Oscar Ubisha Hernández Almeida y Juan Jacobo Schmitter-Soto</i>	
<b>4</b>	<b>Los servicios ecosistémicos</b>	229
	<b>Coordinadores de capítulo:</b> <i>Patricia Balvanera, Cynthia Armendáriz Arnez y Alejandra Tauro</i>	
<b>5</b>	<b>Herramientas y estrategias para el estudio y la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad</b>	341
	<b>Coordinadores de capítulo:</b> <i>David González Solís, Rebeca Quiñonez Piñón y Víctor Hugo Luján Molina</i>	
	<b>Conclusiones generales</b>	437
	<i>Ricardo Rodríguez-Estrella, Patricia Balvanera, Juan J. Schmitter-Soto, Lucía Almeida-Leñero y Jesús Ernesto Arias-González</i>	

# 5 Herramientas y estrategias para el estudio y la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad

**Coordinadores de capítulo:** David González Solís<sup>1</sup>, Rebeca Quiñonez Piñón<sup>2</sup>, Víctor Hugo Luja Molina<sup>3</sup>.

**Coordinadores de sección:** Víctor Arriola Padilla<sup>4</sup>, Everardo Barba Macías<sup>5</sup>, Patricia Cortés Calva<sup>6</sup>, Cecilia Elizondo<sup>1</sup>, Marina Olivia Franco Hernández<sup>7</sup>, Luis Ignacio Iñiguez Dávalos<sup>8</sup>, María de Lourdes Jiménez Badillo<sup>9</sup>, Alfredo Ortega Rubio<sup>6</sup>, Alejandro Ponce Mendoza<sup>4</sup>, Gerardo Rodríguez Quiroz<sup>10</sup>, Joaquín Sosa Ramírez<sup>11</sup>, Francisco Valadez Cruz<sup>12</sup>, María Soledad Vásquez Murrieta<sup>13</sup>.

**Coautores:** Arturo Aguirre León<sup>14</sup>, Lucía Almeida-Leñero<sup>15</sup>, Ahime Álvarez Vela<sup>9</sup>, Myriam Adela Amezcua Allieri<sup>16</sup>, Guillermo Ángeles Álvarez<sup>17</sup>, Aurora Breceda Solís Cámara<sup>6</sup>, Laura Georgina Calva Benítez<sup>2</sup>, José Manuel Castro Pérez<sup>18</sup>, Luis Cervantes Peredo<sup>17</sup>, Jorge Luis Chagoya Fuentes<sup>19</sup>, Victoria Díaz Castañeda<sup>20</sup>, Silvia Díaz Ruiz<sup>2</sup>, Reginaldo Durazo<sup>21</sup>, Feliciano Estrada Loreto<sup>5</sup>, José G. García Franco<sup>17</sup>, Teresa Margarita González Martínez<sup>15</sup>, Francisco José Gutiérrez Mendieta<sup>2</sup>, Ana Laura Ibáñez Aguirre<sup>2</sup>, Claudia Leonor Ibarra Sánchez<sup>13</sup>, Aída Martínez López<sup>22</sup>, Alejandro Medina Quej<sup>18</sup>, Leticia Montoya Bello<sup>17</sup>, Patricia Moreno Casasola<sup>17</sup>, Miguel Ángel Mosqueda Cabrera<sup>14</sup>, Enrique Núñez Lara<sup>23</sup>, Roger Orellana Lanza<sup>12</sup>, Isai Pacheco Ruiz<sup>24</sup>, Patricia Padilla Vargas<sup>4</sup>, Ramiro Pérez Miranda<sup>4</sup>, Jesús Felipe Poblano Amparán<sup>25</sup>, David Alberto Salas de León<sup>26</sup>, Laura Sánchez Velasco<sup>22</sup>, Georgina Santos Barrera<sup>15</sup>, María del Rocío Torres Alvarado<sup>2</sup>, Mirna Valdez Hernández<sup>1</sup>, Francisco Varona Cordero<sup>2</sup>, Gabriela Vázquez Hurtado<sup>17</sup>, Gilberto Velázquez Angulo<sup>27</sup>.





### **Adscripciones:**

<sup>1</sup> El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)-Unidad Chetumal; <sup>2</sup> Departamento de Hidrobiología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)-Unidad Iztapalapa; <sup>3</sup> Unidad Académica de Turismo, Coordinación de Investigación y Posgrado, Universidad Autónoma de Nayarit; <sup>4</sup> Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) <sup>5</sup> Ecosur-Unidad Villahermosa; <sup>6</sup> Programa de Planeación Ambiental y Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste; <sup>7</sup> Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional (IPN); <sup>8</sup> Centro Universitario del Sur, Universidad de Guadalajara; <sup>9</sup> Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana; <sup>10</sup> Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Sinaloa, IPN; <sup>11</sup> Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes; <sup>12</sup> Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.; <sup>13</sup> Departamento de Microbiología, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN; <sup>14</sup> División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Unidad Xochimilco; <sup>15</sup> Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM); <sup>16</sup> Medio Ambiente, Instituto Mexicano del Petróleo; <sup>17</sup> Departamento de Ecología Funcional, Instituto de Ecología, A.C.; <sup>18</sup> Ciencias Biológicas, Instituto Tecnológico de Chetumal; <sup>19</sup> Campo Experimental Ixtacuaco, <sup>20</sup> Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; <sup>21</sup> Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California campus Ensenada (UABC); <sup>22</sup> Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN; <sup>23</sup> Universidad Autónoma del Carmen; <sup>24</sup> Instituto de Investigaciones Oceanológicas, <sup>25</sup> Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez; <sup>26</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM; <sup>27</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

## Introducción

Con el objeto de comprender mejor el funcionamiento de los ecosistemas y planificar de manera estratégica su conservación y aprovechamiento, es fundamental contar con información básica acerca de sus características ambientales. Para ello se han desarrollado varias herramientas, a fin de recolectar datos, procesarlos, analizarlos y presentar los resultados.

Los sistemas de monitoreo se han empleado para medir cuantitativa o cualitativamente y de manera sistemática las propiedades físicas, químicas, biológicas y socioeconómicas de los componentes y procesos de los ecosistemas (Parr *et al.*, 2002). Por medio de ellos se evalúan las tendencias de cambios o se analizan datos periódicos y comparables para describir el estado del ambiente (Meijers, 1986; Christensen *et al.*, 1996; Abbot y Guijt, 1998).

El monitoreo de los ecosistemas es cada vez más útil en la toma de decisiones sobre políticas públicas y en la generación de acuerdos ambientales (Danielsen *et al.*, 2009). Sin embargo, no se ha visualizado como una prioridad debido a sus elevados costos y a lo compleja que puede resultar su implementación (Danielsen *et al.*, 2009), de ahí que sea excluido con frecuencia de las actividades de manejo de los ecosistemas (McDonald y Smart, 1992).

En el contexto internacional existen solo algunos programas consolidados de monitoreo a largo plazo; por ejemplo, el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP) y la Red Internacional de Investigación Ecológica a Largo Plazo (International Long-Term Ecological Research Network, ILTER) (Parr *et*

*al.*, 2002). En México, la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red Mex-Lter) es quizá el ejemplo nacional más consolidado en materia de monitoreo ecosistémico (Maass *et al.*, 2010).

La creciente presión sobre los ecosistemas, su complejidad, así como el insuficiente conocimiento que se tiene de ellos, promueve la necesidad de desarrollar herramientas tales como los indicadores, que permitan detectar y evaluar el impacto humano en los ecosistemas. Estos son importantes para la toma de decisiones a corto plazo y la reducción del deterioro de los ecosistemas. La capacidad para identificar de manera adecuada a un indicador es fundamental, a fin de tomar mejores decisiones, ya que una elección incorrecta puede llevar a interpretaciones y acciones equivocadas.

### Acerca de este capítulo

El objetivo de este capítulo es mostrar las principales herramientas (monitoreo y uso de indicadores) empleadas para el estudio y el manejo de los ecosistemas y su biodiversidad. Para esto se analizó de manera cuantitativa y cualitativa el uso de sistemas de monitoreo e indicadores, así como la información que estos han generado durante los últimos 10 años en los diferentes ecosistemas de México. Además, se analizaron las estrategias implementadas a nivel nacional para la protección de ciertos ecosistemas y su biodiversidad (áreas naturales protegidas). Con esta información contribuimos al conocimiento sobre el estado actual del monitoreo ambiental, el uso de indicadores y el establecimiento de las áreas naturales protegidas en México, así como a la identificación de vacíos de información cuyo tratamiento es prio-



En los últimos 50 años las alteraciones ocasionadas por los seres humanos en los ecosistemas terrestres se han incrementado de manera drástica, al modificar en gran medida su composición y funcionamiento.

ritario para fortalecer los planes de protección de los ecosistemas y su biodiversidad en el país.

Este capítulo está formado por tres secciones principales:

- Monitoreo ambiental de los ecosistemas y su biodiversidad.
- Desarrollo y uso de indicadores.
- Alcances del Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

La primera sección describe el estado de los sistemas de monitoreo de los ecosistemas en tres grandes hábitats: terrestre, costero y oceánico, considerando la intensidad del monitoreo, sus resoluciones espaciales y temporales, los ambientes con mayor cantidad de información, el tipo de información comúnmente recopilada, la accesibilidad de esta y los formatos existentes. En la segunda se presenta un análisis de los programas de monitoreo ambiental en México y de los indicadores utilizados. Finalmente, la tercera sección analiza los alcances y la cobertura geográfica del programa de Áreas Naturales Protegidas en México como una estrategia para la protección de la biodiversidad.

## Monitoreo ambiental de los ecosistemas y su biodiversidad

### Ecosistemas terrestres

#### *Relevancia del tema*

México es uno de los cinco países con mayor diversidad biológica en el mundo (Mittermeier y Goettsch, 1992). En nuestro territorio existe una décima parte de las especies de plantas superiores del planeta, de las

cuales cerca de la mitad son endémicas (Mittermeier *et al.*, 1997); ocupa además el tercer lugar mundial en presencia de reptiles, anfibios, aves y mamíferos (Williams *et al.*, 2001). No obstante, durante los últimos 50 años las alteraciones ocasionadas por los seres humanos en los ecosistemas terrestres se han incrementado de manera drástica al modificar en gran medida su composición y funcionamiento (Abarca, 2007). Sánchez Colón *et al.* (2009) reportan que la pérdida de cobertura de los ecosistemas terrestres en México es de 103,289 km<sup>2</sup> en selvas húmedas, 94,223 km<sup>2</sup> en selvas subhúmedas, 129,000 km<sup>2</sup> en bosques templados, 91,000 km<sup>2</sup> en matorrales xerófilos y más de 59,000 km<sup>2</sup> en pastizales.

La mayoría de estas alteraciones se han registrado y documentado en forma tardía, lo cual desfasa la implementación de acciones para el manejo sustentable de los recursos naturales, así como la protección de los ecosistemas y su biodiversidad. Incluso en la actualidad existen ecosistemas sin registro de datos que permitan evaluar su nivel de degradación. La carencia de información es una forma de impacto ambiental, pues el limitado conocimiento de los procesos ecológicos promueve la degradación de los ecosistemas (Maass *et al.*, 2010). En este sentido, el monitoreo representa una poderosa herramienta para la conservación de los hábitats y sus especies, pues permite la toma de decisiones informada y fundamentada en datos confiables para su manejo, planeación y gestión (McDonald y Smart, 1992).

#### *Cantidad y calidad de la información*

Si bien en México se han realizado algunos estudios de monitoreo de los ecosistemas terrestres, el tema no puede considerarse muy desarrollado. Para evaluar el estado actual de la materia se analizaron 55

publicaciones científicas, cuyo objetivo principal está ligado a un monitoreo ambiental de un ecosistema terrestre, sin incluir las series periódicas de datos carentes de un marco conceptual de monitoreo. La información de los sistemas de monitoreo puede ser general –la registrada a gran escala espacio-temporal–, o específica –la de pequeña escala.

En términos cuantitativos y en sentido amplio, 70% de los monitoreos generaron información primaria, 14% utilizaron otras fuentes de datos, es decir, no generaron información propia, y 16% además de generar información propusieron nuevas técnicas o métodos de monitoreo. De los trabajos con información primaria y propositivos, dos terceras partes fueron monitoreos de variables bióticas, y el resto de abióticas (véase cuadro 1).

El monitoreo de hábitats terrestres se ha desarrollado con mayor frecuencia en zonas urbanas y en bosques templados; en contraste, los bosques mesófilos son los que han recibido menor atención. Otros ecosistemas, como los pastizales, los matorrales xerófilos, los bosques tropicales secos y húmedos y los agroecosistemas, tienen en promedio un 6% del total de la información del monitoreo ambiental. La mayor parte de los trabajos enfocados en el estudio de las variables bióticas se han desarrollado en ecosistemas naturales, mientras que el registro de información de variables abióticas es más frecuente en zonas urbanas. Cabe mencionar que se ha llevado a cabo un solo trabajo de monitoreo en bosques mixtos de pino-encino y oyamel.

En las zonas urbanas, la mayoría de los monitoreos se han enfocado en la medición de la calidad del aire. En menor medida se han estudiado las características físico-químicas del suelo y del agua, los parámetros climáticos, los incendios forestales, el cambio

de uso del suelo y su conservación, así como los procesos hidrológicos. Los últimos cuatro aspectos también se incluyen en el resto de los ecosistemas.

Con respecto a las variables bióticas, el monitoreo se ha enfocado principalmente en las poblaciones silvestres de plantas y animales, sobre todo en la avifauna. Otro tema con gran número de publicaciones es el monitoreo de la vegetación mediante herramientas de percepción remota. En menor grado lo son los procesos funcionales, la incidencia de plagas, la calidad forestal, los procesos de regeneración y la biodiversidad.

#### *Prioridades de investigación*

Con base en los promedios de calificación de cantidad de la información disponible, es evidente que en México el monitoreo ambiental de ecosistemas terrestres es escaso. En este sentido, resulta prioritario generar programas de monitoreo con marcos metodológicos estándares (técnicas de medición y registro comunes), a fin de facilitar la integración de datos provenientes de programas de monitoreo desarrollados en distintos tipos de ecosistemas. De esta forma se evitaría la duplicidad de trabajo e información. Los tipos de monitoreo más importantes para la protección de los ecosistemas y su biodiversidad son aquellos que se establecen en un marco de registro de datos a corto, mediano y largo plazos, así como a media y a gran escala.

Algunos ecosistemas no cuentan con programas de monitoreo de variables abióticas, lo cual se refleja en una carencia de información ambiental de gran relevancia. Tal es el caso del bosque mesófilo de montaña, el tropical húmedo y el tropical seco, todos ellos amenazados por las actividades humanas.

El escaso monitoreo de los bosques mesófilos de montaña es preocupante, pues es el ecosistema más

**El monitoreo de hábitats terrestres se ha desarrollado con mayor frecuencia en zonas urbanas y en bosques templados; en contraste, los bosques mesófilos son los que han recibido menor atención.**

## El monitoreo simultáneo de variables bióticas y abióticas es importante para caracterizar las causas y los efectos de los cambios en tiempo real.

amenazado en el país y porque su distribución es muy restringida (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio, 2010). Estos ecosistemas presentan una alta diversidad biológica, así como un gran porcentaje de géneros endémicos (Challenger y Soberón, 2008). Además, desempeñan un papel clave en la regulación de los ciclos hidrológicos y de nutrientes a nivel del paisaje (Toledo, 2009).

Al igual que ha sucedido con otros ecosistemas, los bosques tropicales húmedos ocupan hoy en día menos de la mitad de su área original como consecuencia de las actividades humanas. Su monitoreo también ha sido escaso, a pesar de que la diversidad de sus especies es mayor que la existente en cualquier otro ecosistema terrestre (Rzedowski, 2006; Challenger y Soberón, 2008).

Por su parte, los matorrales xerófilos y los bosques tropicales secos tienen amplia distribución en México y albergan una considerable porción de la flora endémica del país (Trejo, 1996; Rzedowski, 2006). Estos ecosistemas presentan características relevantes que están seriamente amenazadas por las actividades humanas y que han sido poco monitoreadas, lo cual hace prioritario su estudio.

Los agroecosistemas, a pesar de su importancia por la estrecha relación que tienen con las actividades humanas y el impacto que estas causan en los ecosistemas y su biodiversidad, han sido muy poco monitoreados. En este sentido, resulta fundamental orientar los esfuerzos hacia temas tales como los efectos de los organismos genéticamente modificados y la desertificación de los suelos, al igual que hacia la alteración de las cuencas y su hidrología, entre otros aspectos.

Entre las variables abióticas debe prestarse atención a todas aquellas relacionadas y generadas por eventos tales como incendios forestales, cambio de

uso del suelo, erosión y procesos hidrológicos. En cuanto a las variables bióticas, deben incluir procesos funcionales, incidencia de plagas, calidad forestal, regeneración y biodiversidad.

El monitoreo simultáneo de variables bióticas y abióticas es importante para caracterizar las causas y los efectos de los cambios en tiempo real. Otro punto fundamental en la planeación de programas de monitoreo es la determinación de su escala espacio-temporal, con base en el tipo de variables que serán medidas, puesto que estas actúan en diferentes tiempos y su distribución espacial puede ser local, regional o global. Algunas variables son representativas de dinámicas ecosistémicas a una escala espacio-temporal específica, como en el caso del microclima, donde los valores de sus variables son representativos a nivel local, incluso puntual, pero son irrelevantes para el clima regional.

### **Ecosistemas costeros**

#### *Relevancia del tema*

Los ecosistemas costeros son vulnerables a los efectos de las actividades antropogénicas; la fragmentación y destrucción del hábitat, la sobreexplotación de recursos, los contaminantes de distintas fuentes y el cambio climático global, el cual provoca calentamiento de los océanos, acidificación de sus aguas, elevación del nivel del mar y modificación de los flujos dulceacuícolas que pueden alterar seriamente su composición y funcionamiento. Para conocer el estado actual de los ecosistemas costeros y proponer estrategias para su conservación es necesario establecer programas de monitoreo continuo (Costello *et al.*, 2010). La evaluación aquí presentada es una pauta para diagnosticar el grado de avance y orientar sobre las prioridades de desarrollo en el monitoreo ambiental de los ecosistemas costeros en México.

### *Cantidad y calidad de la información*

Para evaluar el estado de la materia se analizaron 646 publicaciones científicas enfocadas en el monitoreo de uno o varios ecosistemas costeros. La información se clasificó por hábitat (lagunas costeras, estuarios, arrecifes coralinos, marismas y manglares) y por regiones geográficas (Pacífico Norte, Pacífico Centro-Sur, Golfo de México y Caribe mexicano). Además, se identificó el tipo de monitoreo desarrollado con base en las variables estudiadas (bióticas, abióticas y contaminantes bióticos y abióticos) (véase cuadro 2).

Una gran parte de los trabajos publicados se han enfocado en el monitoreo de las lagunas costeras; en contraste, los estuarios, humedales, y zonas litorales y sublitorales (zona intermareal) han recibido poca atención. Con respecto a su distribución geográfica, el Pacífico Norte (en particular la península de Baja California) cuenta con el mayor porcentaje de monitoreos de lagunas costeras, seguido por el del Golfo de México (en especial el desarrollado en Veracruz y Campeche) y el Caribe; el menor porcentaje corresponde al monitoreo en el Pacífico Centro-Sur.

En cuanto al monitoreo de arrecifes coralinos, el mayor esfuerzo se ha desarrollado en el Caribe mexicano, seguido por el realizado en el Pacífico Norte y el efectuado en el Golfo de México. Cabe destacar que no hay información alguna sobre la región del Pacífico Centro-Sur.

Los ecosistemas costeros que han recibido menor atención son los humedales -marismas y manglares- y por lo general se integran en algún otro monitoreo (por ejemplo, de lagunas costeras). En una cantidad igual al monitoreo de los arrecifes de coral está el de las zonas litoral, sublitoral, costera o bahías. Al igual que con estuarios y humedales, las anteriores zonas son integradas como parte del monitoreo de

otros ecosistemas, en especial el de las lagunas costeras. En este tipo de ecosistemas el Pacífico Norte y el Caribe mexicano cuentan con la mayor parte de los estudios de las zonas costeras, mientras que el Pacífico Centro-Sur y el Golfo de México son inusuales en este tipo de estudios.

Por lo tanto, el grado de conocimiento a través del monitoreo ambiental es heterogéneo, ya que, en comparación con otros, hay ecosistemas costeros y regiones más estudiados, como las lagunas costeras, tal vez porque son los más abundantes en las costas mexicanas, con un total de 452 lagunas que cubren un área de 1,567,300 hectáreas (Contreras, 2000).

La cantidad de la información relacionada con el monitoreo de las características fisicoquímicas, biológicas y de contaminación de los diferentes ecosistemas costeros es sumamente variable, tanto desde el punto de vista de la periodicidad del muestreo como del tipo de variables monitoreadas. En lo que se refiere a la periodicidad, hay estudios que se realizan en un periodo estacional de muestreo -ya sea durante la época de seca, de lluvias o de nortes-, y otros que abarcan diferentes épocas climáticas a lo largo de un ciclo anual, siendo escasos los trabajos que reportan resultados de muestreos continuos durante más de cinco años. Con respecto al tipo de variable, las investigaciones relacionadas con aspectos de la biodiversidad son las más abundantes.

El monitoreo de la diversidad biológica de los ecosistemas costeros, si bien es más común que el de las demás variables, tampoco es uniforme. Se tiene una mayor cantidad de estudios de organismos zoobénticos (sobre todo crustáceos y moluscos) y necton (peces), seguidos por las investigaciones en fitoplancton y zooplancton; sin embargo, por lo general dichos estudios se centran en un grupo taxonómico,

## Es necesario realizar estudios de monitoreo continuo y simultáneo, a través de una investigación interdisciplinaria que incluya aspectos físico-químicos, de contaminación y diversidad biológica en los ecosistemas costeros, en especial en humedales (marismas y manglares) y arrecifes coralinos.

incluso en una o dos especies, siendo escasos los trabajos que incluyen un análisis a nivel de comunidad. Las investigaciones sobre la diversidad de bacterias y procesos microbianos son escasas.

Con respecto a las variables abióticas, en la columna de agua los parámetros físicoquímicos comúnmente monitoreados son la temperatura, la salinidad, el pH, el oxígeno disuelto y los nutrientes. Resalta la escasez de información sobre aspectos hidrodinámicos. El conocimiento sobre sedimentos es mucho menor que el correspondiente a la columna de agua. La información está relacionada con la textura y el contenido orgánico (materia orgánica, carbono y nitrógeno).

En las investigaciones sobre contaminación de la zona costera predominan los estudios de metales pesados, hidrocarburos fósiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y bifenilos policlorados (PCB), sobre todo en sedimentos y moluscos bivalvos de importancia comercial (ostiones y mejillones). En menor proporción, existe también monitoreo de indicadores microbiológicos, bacterias patógenas y parásitos, así como de mareas rojas. Cabe destacar que hay una cantidad importante de información relacionada con monitoreos que solo se reporta en memorias de congresos.

### *Prioridades de investigación*

Es necesario realizar estudios de monitoreo continuo y simultáneo, a través de una investigación interdisciplinaria que incluya aspectos físico-químicos, de contaminación y diversidad biológica en los ecosistemas costeros, en especial en humedales (marismas y manglares) y arrecifes coralinos. Estos ambientes están en constante estrés ambiental debido a las actividades humanas, sobre todo el turismo y la urbanización. En México se conoce poco de sus procesos

ecosistémicos, pero se sabe del peligro de desaparición que corren y de la carencia de programas de protección. Es imperativo que en el futuro cercano se planee un monitoreo que permita caracterizarlos y manejarlos de manera sustentable.

En el caso de las lagunas costeras y los estuarios, se considera adecuado seleccionar los ecosistemas representativos de cada región, definir en forma detallada los objetivos de nuevos monitoreos en las lagunas que ya cuenten con trabajos abundantes, a fin de evitar la duplicidad de esfuerzos, e identificar cambios en los procesos que sean un indicio de pérdida del sistema o de las especies que alberga. Un programa de monitoreo continuo permitirá determinar el comportamiento de las variables ambientales y biológicas a diferentes escalas espacio-temporales, así como la proporción de cambios debidos a modificaciones climáticas o influencia humana. También es indispensable realizar investigaciones que incluyan la relación de los diferentes ecosistemas costeros entre sí y con la cuenca terrestre adyacente (conectividad), a fin de poder proponer las medidas más adecuadas para su uso y conservación.

### **Ecosistemas oceánicos**

#### *Relevancia del tema*

El área oceánica representa un 93% de los mares mexicanos. En esta zona, las series de observaciones a largo plazo son sumamente importantes para comprender procesos o fenómenos fuera de la resolución de los muestreos tradicionales de campo. Series de tiempo de esta naturaleza han permitido documentar, en algunas regiones, fenómenos no lineales e identificar las interacciones entre los organismos marinos y su medio. Probablemente, una de las interacciones de mayor interés en los ecosistemas pelágicos es la

que se da entre los forzamientos físicos dominantes y los procesos biogeoquímicos, pues determinan las tasas de producción de biomasa marina explotable como alimento.

Por lo antes expuesto, resulta de gran relevancia el establecimiento de observatorios de monitoreo oceánico que proporcionen información primaria a quienes toman decisiones, así como a la sociedad y a la comunidad científica, para las políticas de manejo sustentable de recursos, y la posibilidad de desarrollar capacidad predictiva, detectar, describir, entender y explicar cambios y patrones climáticos a gran escala, como el incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico y la acidificación del océano. Los observatorios representan la mejor alternativa para detectar eventos que han pasado inadvertidos durante décadas, debido a la resolución espacial de los muestreos.

#### *Cantidad y calidad de la información*

En el Pacífico noroccidental de México han funcionado programas de monitoreo intermitentes. Frente a Baja California, el programa California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI) realizó observaciones durante el período 1950-1974 ([calcofi.org/ccpublications/ccreports.html](http://calcofi.org/ccpublications/ccreports.html)); después, entre 1980-1986, instituciones como el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (Cicimar) mantuvieron el monitoreo con los mismos lineamientos, y el programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (Imecocal) lo continuó entre 1997 y 2011. Otros programas, como el Programa Oceanográfico del Occidente de México (Procomex), estudiaron la hidrografía y variabilidad de la zona del mínimo de oxígeno en la costa del Pacífico Tropical Oriental (centro-sur). Además, existen programas de monitoreo en el Golfo de México y en el Caribe mexicano,

realizados por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Hay también esfuerzos más puntuales que proveen información con excelente cobertura temporal. Tal es el caso del monitoreo sinóptico intermitente (2005-2007) de las condiciones meteorológicas, temperatura superficial y color del océano que realizó el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL) de la UNAM cerca de la Isla Socorro, Archipiélago de Revillagigedo, en el Pacífico mexicano. Una iniciativa vigente es el proyecto del CICESE denominado Investigaciones Oceanográficas del Sistema Frontal de Baja California Sur, en la región de transición tropical-subtropical del Pacífico de México. También existen monitoreos puntuales de variables físicas y biogeoquímicas en las costas del Pacífico (Ensenada, Magdalena, Manzanillo, Tehuantepec) y del Golfo de México y el Caribe (Tamaulipas, Progreso, Chetumal) por diferentes instituciones. Por su parte, la Secretaría de Marina Armada de México (Semar), a través de sus estaciones de investigación oceanográfica, ha realizado cruceros oceanográficos, incluso en aguas oceánicas profundas. Sin embargo, no existe a la fecha una plataforma donde se pueda consultar la información recabada.

Recientemente inició el proyecto titulado Establecimiento de Línea de Base en Aguas Profundas del Golfo de México en Respuesta al Derrame Petrolero Asociado a la Plataforma Deepwater Horizon, cuyo objetivo es evaluar los posibles impactos del derrame mencionado a corto, mediano y largo plazos. También hay información de más de 30 años sobre la circulación en la bahía de Campeche en todas las profundidades, así como la distribución y abundan-



cia de especies del plancton y condiciones físico-químicas, resultado de trabajos de Semar, Petróleos Mexicanos (Pemex), Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y UNAM. De hecho, si bien se cuenta con índices para medir el impacto de la contaminación por petróleo elaborados con una base de datos de más de 25 años de muestreos sistemáticos realizados por el ICMYL de la UNAM, esta información no es accesible (Salas de León, comunicación personal).

De manera paralela, el citado derrame petrolero también fue monitoreado por Conabio, a través del Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico (Satmo, <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/satmo/>), desarrollado en 2002 para proporcionar, en tiempo casi real, un seguimiento continuo de la temperatura superficial del mar diurna y nocturna, así como de otros parámetros biofísicos del color del océano, como la concentración de clorofila *a*, la fluorescencia de la clorofila, el coeficiente de atenuación difusa y la concentración de material total suspendido, al igual que la reflectancia teledetectada.

Iniciativas en conjunto con instancias internacionales, como las boyas de la cuenca de Yucatán, Caribe mexicano, Campeche, Manzanillo y Acapulco, a cargo de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) (<http://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml>), han generado información sobre variables tales como altura de la columna de agua, viento, temperatura del aire y temperatura superficial del agua, y oleaje, entre otras. Además de estas boyas, Pemex (en contrato con el CICESE) mantiene en operación tres boyas metoceanicas (<http://cicese-pemex.cicese.mx/webdb/pub/index.php?mod=ini>) en tres puntos del Golfo de México, las cuales miden, almacenan y transmiten información meteorológica y oceanográfica.

En el Pacífico septentrional opera el Programa de Fuentes y Sumideros de Carbono en los Márgenes Continentales del Pacífico Mexicano (Flucar), con una boya cerca de Ensenada. En 2008, el programa Imecocal instaló una segunda boya frente a la Bahía Magdalena ([http://imecocal.cicese.mx/boyas/boya\\_anclada.html](http://imecocal.cicese.mx/boyas/boya_anclada.html)). Ambas boyas miden temperatura, salinidad, pCO<sub>2</sub> del agua y pCO<sub>2</sub> de la atmósfera. Hay que mencionar también la creación del Observatorio Jacques-Yves Cousteau de los Mares y Costas Base Pacífico Mexicano, iniciativa franco-mexicana.

A pesar de los avances logrados en el monitoreo de variables ambientales del océano, la mayor parte de los esfuerzos son iniciativas de investigación, no una política nacional. Se debería contar con un programa estratégico del país, que establezca, además de las necesidades, las acciones a realizar. Un programa como este permitirá fortalecer las políticas de manejo sustentable de recursos existentes y elaborar las respuestas ante fenómenos naturales (por ejemplo, florecimientos de algas y tormentas).

Para evaluar el monitoreo de los océanos mexicanos se analizaron 67 publicaciones indizadas, de las cuales más de la mitad se refieren al Pacífico Norte (sobre todo a Baja California) con mediciones de una gama importante de variables. Le siguen en cantidad de investigaciones las correspondientes al Pacífico Centro-Sur y al Golfo de México. Por su parte, el Caribe mexicano tiene el menor porcentaje de programas de observación marina (véase cuadro 3).

Con respecto a las variables del monitoreo oceánico en todas las regiones, salvo por los procesos biogeoquímicos, climáticos y contaminantes, ellas están en general en fase de elaboración. A pesar de que no han existido programas de monitoreo a largo plazo,

en algún momento hubo por lo menos uno de estos programas en cada región. Una vez más, el Pacífico Norte cuenta con un amplio trabajo de monitoreo de la mayoría de las variables, a excepción de las hidrodinámicas, biogeoquímicas y aquellas relacionadas con procesos de contaminación (véase cuadro 3).

#### *Prioridades de investigación*

El avance logrado en estas décadas se centra en la física del océano, debido en parte a que el estudio de la biodiversidad de microorganismos y los procesos biogeoquímicos requiere de grandes esfuerzos. Es necesario crear plataformas de registros de largo plazo, sostenibles y continuos, en localidades geográficas fijas, para generar series de tiempo relacionadas con el océano y el clima. Existe también la necesidad de monitorear aerosoles y material suspendido en el océano, calibrando datos *in situ*.

Para ello es preciso consolidar grupos multidisciplinarios, a fin de estudiar regiones oceánicas y buscar recursos para el reemplazo de buques oceanográficos -la mayoría de ellos son prácticamente obsoletos- y su incremento en número. Un Centro Nacional de Operación de Buques de Investigación permitiría administrarlo, hacerlo funcionar y mantenerlo, teniendo una cercana relación de trabajo con los grupos de investigación a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt).

Además, deberá establecerse una infraestructura de registro continuo de largo plazo con autonomía para así caracterizar los procesos físico-químicos y biológicos de los océanos y proteger su biodiversidad. Esta información, invaluable para generar políticas de desarrollo y protección del ambiente, debe estar concentrada en un espacio común para que se encuentre disponible, por lo que se sugiere la crea-

ción de un Centro Nacional de Bases de Datos provenientes de estos observatorios.

## Desarrollo y uso de indicadores

#### *Relevancia del tema*

Los indicadores ambientales son variables bióticas y abióticas que ayudan a recrear procesos de forma indirecta. Ellos son una herramienta y no un fin en sí mismos, apoyan en la toma de decisiones a corto plazo, así como en el monitoreo y reducción del deterioro de los ecosistemas y, en última instancia, aumentan la comprensión de estos últimos (Heink y Kowarik, 2010; Cáceres *et al.*, 2012). Los indicadores ambientales deben cumplir con las características propuestas por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) o por la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos ([www.nasonline.org](http://www.nasonline.org)).

Un ejemplo conocido de indicador ambiental son los Florecimientos Algales Nocivos (FAN), comúnmente denominados mareas rojas, los cuales se han utilizado recientemente como una evidencia del deterioro ambiental en las costas mexicanas. El florecimiento de algas nocivas se debe al incremento de las actividades acuícolas, a las consecuencias del impulso turístico y a la descarga de aguas residuales, todo lo cual provoca un incremento anormal de nutrientes y un desequilibrio en el ambiente marino (Ochoa *et al.*, 2003).

Si bien un indicador ambiental se define usualmente como una medida cuantitativa del estado y desarrollo del ambiente o de las condiciones que lo afectan (Alfsen y Sæbø, 1993); otras definiciones lo colocan como parámetros o mediciones finales (Burger,

---

**Un ejemplo conocido de indicador ambiental son los Florecimientos Algales Nocivos (FAN), comúnmente denominados mareas rojas, los cuales se han utilizado recientemente como una evidencia del deterioro ambiental en las costas mexicanas.**

2006), mediciones de entidades (Gordon *et al.*, 2005) o variables (Hughes y Madden, 2003); de ahí la conveniencia de hacer explícita la definición usada en cada proyecto.

En México, las variables físicas, químicas y biológicas se han utilizado como herramienta para evaluar la salud de los ecosistemas; sin embargo, su uso como indicadores ha sido limitado. Por ejemplo, en los ecosistemas terrestres poco se sabe de los recursos edafológicos, en particular de sus aptitudes y su vulnerabilidad, lo cual deriva en fallas en la regulación de su manejo y aprovechamiento (Cotler, 2003).

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), a través del Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA), compila indicadores nacionales de desempeño ambiental. El SNIA incluye alrededor de 120 indicadores que describen, con cierta amplitud, las tendencias de cambio, la situación actual del ambiente y los recursos naturales del país, así como las presiones que los amenazan y las respuestas institucionales que atienden su problemática ([www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)). Lamentablemente, la escala más fina de estos indicadores se ubica a nivel estatal, lo que complica trasladarlos al nivel de municipio o comunidad.

#### *Cantidad y calidad de la información*

Para evaluar el estado actual en materia de indicadores ambientales se consultaron 112 publicaciones indizadas y se seleccionaron 21 variables confirmadas como indicadores efectivos, aquellas que proporcionan información relevante acerca de la salud de un ecosistema o sobre los cambios en sus procesos físico-químicos y biológicos. La clasificación regional utilizada se enfocó en dos grandes ambientes: acuático y terrestre. A su vez, el acuático se dividió en cinco

grandes ecosistemas, mientras que el terrestre en cuatro (véase cuadro 4).

De acuerdo con la evaluación, la mayor parte del monitoreo de indicadores se ha realizado en la zona costera, seguido por el efectuado en los ecosistemas terrestres de clima templado. A estos les sigue el monitoreo de indicadores en los ecosistemas marinos, lénticos y lóticos. En contraste, los estudios de monitoreo hechos con indicadores en aguas subterráneas, así como en ecosistemas semiáridos, áridos y tropicales, son escasos.

Los indicadores utilizados con mayor frecuencia para medir los cambios ambientales han sido la presencia de especies de macroinvertebrados, en particular en ambientes acuáticos. Las variables físico-químicas son indicadores importantes en la zona costera, con algunos esfuerzos en ecosistemas terrestres templados, tropicales y semiáridos. Las plantas y las macroalgas siguen en el orden de uso como indicadores, sobre todo en la zona costera (macroalgas) y en los ecosistemas terrestres templados (plantas vasculares).

Cerca de un tercio de los trabajos revisados realizaron el monitoreo en alguno de los ambientes terrestres. De ellos, alrededor de una tercera parte utilizó algún organismo vivo como indicador de prácticas agrícolas, urbanización o contaminación; casi la mitad propuso el uso de las especies estudiadas como indicadores, sobre todo en bosques templados de montaña; un porcentaje menor usó algún elemento de su investigación como indicador y unos pocos como monitor biológico (por ejemplo, un organismo que provee información cuantitativa acerca de su hábitat y de los posibles contaminantes). Las especies vegetales utilizadas con mayor frecuencia como indicadores han sido los líquenes y algunas plantas

vasculares, mientras que otros monitoreos se han enfocado en bacterias, hongos, artrópodos y aves. Otros midieron las características físico-químicas del suelo y la actividad microbiana. En cuanto a la distribución geográfica de los estudios, cerca de la mitad de estos se han llevado a cabo en el entonces Distrito Federal y en el Estado de México, algunos en el norte del país y pocos o ninguno en las áreas tropicales (selvas alta perennifolia y baja caducifolia).

Con respecto a los ecosistemas marinos, los indicadores utilizados en el país han sido 10 dinoflagelados y 1 diatomea. También se han usado poliquetos, pastos marinos, peces, esponjas, moluscos, oligoquetos y tanaidáceos. En cuanto a los ambientes acuáticos, más de la mitad de los monitoreos de indicadores se realizaron en Chihuahua, Jalisco, Michoacán, Estado de México y el entonces Distrito Federal.

El monitoreo de los ecosistemas costeros se ha desarrollado principalmente en el Caribe mexicano, en Baja California y en el Golfo de México; en contraste, el Pacífico Centro-Sur ha recibido menor atención. La mitad de los monitoreos se realizó en hábitats bénticos, le siguen los llevados a cabo en lagunas costeras, en columna de agua, en pastos marinos y en marismas. Los indicadores utilizados abarcan mediciones de bacterias, microalgas y fitoplancton, anélidos, moluscos, crustáceos, peces, tortugas, aves y vegetación.

Con base en su cantidad, en el cuadro 4 se muestra que en 7 de los 9 ecosistemas enlistados existe un escaso desarrollo del uso y monitoreo de indicadores ambientales y biológicos en nuestro país. En contraste, los ecosistemas de la zona costera y los terrestres de clima templado registraron un desarrollo relativamente amplio.

En referencia a las variables utilizadas como indicadores, es notorio que algunas se han usado con

mayor frecuencia. Si bien se desconocen las razones de la preferencia por ciertas variables, su flexibilidad de medición en ciertos hábitats podría ser un factor determinante. Debido a esta discrepancia en el uso de los indicadores, el desarrollo por variable suele ser escaso (aunque a veces el uso del indicador es relativamente amplio en un ambiente y en el resto es nulo). Todo parece indicar que el Índice de Contaminación (IC) no ha sido utilizado en monitoreos de indicadores en el país. Cuatro de los 21 indicadores presentaron un desarrollo en elaboración (coliformes totales, actividad enzimática, plantas y macroalgas, peces y tortugas). En comparación con el resto, los indicadores físico-químicos y los macroinvertebrados se encuentran en un desarrollo amplio.

En conclusión, el estudio de los indicadores, su monitoreo y uso para evaluar la salud de los ecosistemas, así como los procesos físico-químicos y biológicos en el país, cuentan con un alto potencial.

#### *Prioridades de investigación*

Con la presente evaluación del estado del monitoreo y uso de indicadores ambientales y biológicos en México se evidencian vacíos de información y de trabajo importantes, y se sugieren prioridades de investigación en el área. Así, en los ambientes marinos se estima necesario incrementar el uso de organismos bénticos como indicadores del estado de salud de este tipo de ecosistema. En los medios lóticos y lénticos se requiere integrar el monitoreo de indicadores tales como microalgas, anfibios, macroinvertebrados y peces para evaluar la calidad del agua. En México, estos organismos se han empleado de forma limitada como indicadores, a excepción de los trabajos con el Índice de Integridad Biótica (IIB) para la conservación de las chinampas en Xochimilco, y el

**Las especies vegetales utilizadas con mayor frecuencia como indicadores han sido los líquenes y algunas plantas vasculares, mientras que otros monitoreos se han enfocado en bacterias, hongos, artrópodos y aves.**

**Es prioritario un monitoreo más profundo sobre el efecto de actividades como la minería, la urbanización, el turismo y la agricultura. Esto es vital para la conservación de los ecosistemas y para que el gobierno y las instituciones educativas transmitan valores ambientales.**

Índice de Contaminación (IC) y el Índice de Calidad del Agua (ICA) en las aguas subterráneas de la Ciudad de México.

Cabe destacar que en el país no hay trabajos publicados sobre el índice específico de contaminación, normalmente estudiado junto con el índice genérico de diatomeas. Este índice requiere de mayor atención, pues se ha probado que provee información relevante para los estados tróficos y los niveles de contaminación de ambientes acuáticos (Kwandras *et al.*, 1998).

Los estudios sobre indicadores en ambientes terrestres y acuáticos se han centrado en la calidad del agua, contaminación y conservación de especies. Es prioritario un monitoreo más profundo sobre el efecto de actividades como la minería, la urbanización, el turismo y la agricultura. Esto es vital para la conservación de los ecosistemas y para que el gobierno y las instituciones educativas transmitan valores ambientales. Los indicadores pueden ser, junto con la difusión de la ciencia, herramientas poderosas para la educación ambiental de las comunidades y de la población en general.

Debido a la complejidad de los ecosistemas, es difícil tener un indicador único para caracterizar su degradación, transformación y fragmentación, así como la interacción de factores bióticos y abióticos. Si bien la mayor parte de los indicadores usados en el país han tenido fines de diagnóstico, es necesario evaluar indicadores para el monitoreo tanto de ambientes naturales como de los modificados por el ser humano, incluyendo a los sistemas resultantes de las actividades agrícolas, ganaderas y de acuicultura (Brock *et al.*, 2009), a fin de analizar las posibilidades de su conservación de manera sustentable.

Además, resulta prioritario incluir nuevas técnicas estadísticas que permitan identificar, con mayor

exactitud y en menor tiempo, los indicadores de la salud del ambiente; y desarrollar metodologías para reconocer las necesidades de los habitantes del lugar (por ejemplo, el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad, MESMIS) (López Ridaura *et al.*, 2002).

A pesar del avance en cuanto a su uso e identificación, todavía se requiere consolidar un sistema de indicadores ambientales con series de tiempo a mediano y largo plazos, lo cual permitirá identificar tendencias y, eventualmente, hacer proyecciones de escenarios posibles con mayor confianza y fundamento.

## Alcances del Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas

### *Relevancia del tema*

La principal estrategia de política ambiental para promover la conservación de los ecosistemas y sus servicios ha sido el establecimiento de un sistema de Áreas Naturales Protegidas; es decir, partes terrestres o acuáticas del territorio nacional, que fueron creadas para proteger una amplia variedad de ecosistemas y su biodiversidad, así como los bienes y servicios que pueden obtenerse de ellos. Ellas están sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, y constituyen en cierta forma unidades productivas estratégicas, generadoras de una corriente vital de beneficios sociales y patrimoniales, los cuales deben ser reconocidos y valorados (Gómez Pompa y Dirzo, 1995).

Si bien el sistema de áreas naturales protegidas es el más consolidado de México para la conservación de la biodiversidad y de los servicios ambientales que

los ecosistemas proporcionan a la sociedad, y parece paradójico, estas áreas no son consideradas un instrumento de política ambiental dentro de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988). Asimismo, este sistema requiere una mejor planeación con el objetivo de asegurar su continuidad.

En la actualidad, México cuenta con 177 áreas naturales protegidas: 41 Reservas de la Biosfera, 66 Parques Nacionales, 5 Monumentos Naturales, 8 Áreas de Protección de Recursos Naturales, 39 Áreas de Protección de Flora y Fauna, y 18 Santuarios, que representan un total de 25,628,239 hectáreas protegidas (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Conanp, 2015) ([http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/)).

En los últimos años se ha documentado ampliamente la riqueza biológica y ecológica de México, con la consiguiente generación de conocimientos científicos cada vez más sólidos sobre la importancia de los bienes y servicios ecosistémicos que proporciona la biodiversidad contenida en las áreas naturales protegidas. La creación, el financiamiento y la administración de estas áreas se constituyen en un instrumento fundamental de la política ambiental nacional, al reconocer sus potencialidades y definir nuevos parámetros para un desarrollo regional sostenible (Conanp, 2007-2012), pues su preservación debe verse como una opción de desarrollo y de calidad de vida de las generaciones presentes y futuras.

Una de las aportaciones más importantes en su gestión es la implementación de los instrumentos de planeación y regulación denominados programas de manejo. En ellos, la administración y el manejo de los recursos naturales se ponen en manos de ciudadanos, autoridades y organismos públicos y privados para

que, de manera colectiva, coordinada y con participación social, se cumplan los objetivos de conservación de estas áreas. El resguardo de los recursos naturales en las áreas naturales protegidas dependerá de la eficacia de estos programas; es por ello que su constante monitoreo y evaluación permiten su mejoramiento continuo.

Es importante aclarar que no todas las áreas naturales protegidas cuentan con un programa de manejo, por lo cual resulta vital elaborarlos y continuar generando conocimiento sobre estas áreas. Cada programa de manejo incorpora, dentro de un marco legal, componentes sociales, económicos y ecológicos, los cuales permiten la generación de estrategias, cuyo fin es promover la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad, mediante su protección, manejo, uso, aprovechamiento y restauración. Asimismo, promueve el apoyo a actividades productivas que impulsen el incremento en la calidad de vida o bienestar de la población, con énfasis en las comunidades rurales e indígenas asentadas dentro o cerca de las áreas protegidas. El programa de manejo es el componente esencial que da sentido a las acciones a desarrollarse en un área natural protegida, ya que permite la toma de decisiones y el establecimiento de prioridades, acciones y actividades relacionadas con la conservación del área protegida, a corto, mediano y largo plazos (Conanp, 2008).

Cabe destacar que el 65% de la superficie de las áreas naturales protegidas federales cuenta con algún reconocimiento internacional, pues forman parte del Patrimonio Mundial Cultural y Natural de la Humanidad, están consideradas Reservas de la Biosfera en el Programa El Hombre y la Biosfera de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura o en la Convención de Ramsar



sobre los humedales. De acuerdo con las categorías de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (International Union for Conservation of Nature, IUCN), solo un 17% de la superficie decretada a nivel federal en las áreas naturales protegidas se considera una reserva estricta (como los parques nacionales), pues en el 83% restante (por ejemplo, las reservas de la biosfera) está permitido el uso de los recursos naturales siempre y cuando este sea sustentable.

La Conanp inició un proceso de certificación voluntaria de áreas de conservación como una estrategia para incorporar áreas del territorio nacional a esquemas de conservación regidos por los propietarios de los predios. Este proceso se hizo efectivo con la modificación de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 16 de mayo de 2008, por medio de la cual se establece incorporar las áreas destinadas voluntariamente a la conservación como una categoría más de las áreas naturales protegidas (artículo 55 bis), pero sus propietarios conservan el dominio, manejo y gobernanza de esas áreas (*Diario Oficial de la Federación*, 2008). Según datos de la Conanp, hasta 2010 existían en el territorio nacional 221 áreas de conservación certificadas, de las cuales 75% están en el estado de Oaxaca. Los ecosistemas que se resguardan en este esquema, en orden de importancia por su extensión, son el bosque tropical seco, el bosque mesófilo de montaña, la selva húmeda, el bosque templado y los humedales. Si se considera que el 70% de las áreas prioritarias para la conservación están en territorios de comunidades y ejidos, se da la oportunidad de proteger de manera conjunta más áreas, al conservar su biodiversidad y fomentar al mismo tiempo un aumento de la calidad de vida de sus pobladores.

#### *Cantidad y calidad de la información*

Por su cobertura, los ecosistemas comprendidos en el Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas pueden resumirse así: selvas (29.5%), bosques (13.3%), matorrales (6.6%), pastizales (1.4%), “especial” (palmar, mezquital y dunas) (10.8%), vegetación hidrófila (34.1%) (Bezaury Creel y Gutiérrez Carbonell, 2009). Es posible concluir que los ecosistemas del país mejor representados son los de vegetación hidrófila y las selvas, y los más pobremente incluidos en el citado sistema son los pastizales y matorrales.

En concreto, los tipos de vegetación incluidos en estas áreas de México son la selva alta perennifolia, la vegetación hidrófila, el bosque mesófilo, el matorral de dunas costeras, el bosque de coníferas, el bosque de encinos, la selva baja caducifolia, el pastizal, la selva mediana caducifolia, la selva alta caducifolia, la selva espinosa, el palmar natural, la vegetación halófila, la vegetación inducida, el matorral, el bosque templado, los petenes y los páramos (véase cuadro 5).

Cada tipo de vegetación se analizó según la información disponible para las nueve regiones administrativas en las que la Conanp divide al país:

- Península de Baja California y Pacífico Norte,
- Norte y Sierra Madre Occidental,
- Noreste y Sierra Madre Oriental,
- Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur,
- Centro y Eje Neovolcánico,
- Occidente y Pacífico Centro,
- Noroeste y Alto Golfo de California,
- Planicie Costera y Golfo de México,
- Península de Yucatán y Caribe mexicano.

Cabe destacar que las regiones con la mayor diversidad de tipos de vegetación y ecosistemas son el Occi-

dente y Pacífico Centro, la Península de Yucatán y Caribe mexicano, y Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur. Con la información proporcionada para cada región es posible detectar cuáles son los temas más y menos atendidos. Para la mayoría de estas áreas, la cantidad de estudios es insuficiente, con algunas excepciones, como la Frontera Sur, Istmo y Pacífico Sur, el Noreste y Sierra Madre Oriental, el Occidente y Pacífico Centro, regiones que tienen más estudios sobre sus tipos de vegetación.

#### *Prioridades de investigación*

Una importante proporción de las áreas naturales protegidas se han establecido en México por situaciones coyunturales, con pocas bases de conocimiento científico, natural y social. Ahora que se cuenta con más información y sensibilidad acerca de los criterios que deben normar el establecimiento de estas áreas, es fundamental que la información científica pertinente y confiable sea la que conduzca este proceso y que las decisiones de política pública se apeguen a los criterios establecidos.

Es importante destacar que en cada área natural protegida, a pesar de los esfuerzos realizados, es posible, y de hecho es urgente e imperativo, desarrollar la investigación requerida para clarificar vacíos de información. Si bien en cada una de ellas se hace un seguimiento y monitoreo de los recursos a partir de su creación, es evidente la necesidad de integrar la información y las acciones llevadas a cabo por los distintos actores involucrados en la conservación, uso y aprovechamiento de sus recursos biológicos, así como el análisis de las amenazas que las acechan. En este contexto, puede concluirse que la información bibliográfica sobre la gran mayoría de los ecosistemas pertenecientes a estas áreas aún es insuficiente. Los esfuerzos de investigación sobre la estructura y el funciona-

miento de los ecosistemas deben enfocarse en especial en las regiones Occidente y Pacífico Centro, y Planicie Costera y Golfo de México.

La necesidad de generar y ordenar la información de los cambios o procesos relativos a los ecosistemas incluidos en cada una de estas áreas es apremiante. Toda acción que afecte los ecosistemas debe evaluarse y monitorearse, tanto para evitar los impactos negativos como para maximizar los posibles cambios positivos. Esta evaluación de amenazas no debe limitarse al diagnóstico de los problemas, sino también a identificar las acciones positivas en pro de la conservación y el manejo efectivos.

Debido a la escasa investigación y a la particularidad de las amenazas en cada área natural protegida, las prioridades de investigación deben definirse de manera específica para cada una de ellas, en concordancia con las políticas de manejo establecidas entre las autoridades y los investigadores cercanos a las comunidades. Las prioridades de investigación identificadas por región son las siguientes:

- Península de California y Pacífico Norte: inventarios de flora y fauna acuática, terrestre y de microorganismos y artrópodos, así como investigación aplicada a la implementación de acciones de manejo.
- Norte y Sierra Madre Occidental: inventarios florísticos y faunísticos; domesticación de especies útiles; respuesta de los ecosistemas ante el cambio climático; estudios poblacionales de especies amenazadas; estudios antropológicos y desarrollo comunitario; investigaciones a largo plazo; estudios sobre el efecto de las especies invasoras; evaluación de los servicios ambientales
- Noreste y Sierra Madre Oriental: inventarios de biodiversidad; procesos ecológicos, servicios ambien-

**En cada área natural protegida, a pesar de los esfuerzos realizados, es urgente e imperativo desarrollar la investigación requerida para clarificar vacíos de información.**

tales, aplicaciones al manejo; procesos socioambientales.

- Frontera Sur, Istmo, Pacífico Sur: inventarios florísticos y faunísticos; estudios de la biodiversidad; uso social de los ecosistemas; servicios ambientales; salud de los ecosistemas; evaluación de especies sobreexplotadas; cambio climático; calidad del agua; estudio de especies invasoras e introducidas; estudios ecosistémicos.
- Centro y Eje Neovolcánico: endemismo terrestre y acuático; inventarios de la biodiversidad.
- Occidente y Pacífico Centro: procesos de deforestación, fragmentación de ecosistemas; dinámica espacio-temporal en distintas coberturas; manejo sustentable del ecosistema desde un enfoque holístico; estudios multidisciplinarios y desarrollo rural sustentable.
- Noroeste y Alto Golfo de California: inventarios faunísticos acuáticos; implementación de acciones de manejo; desarrollo de acciones multidisciplinarias; políticas públicas.
- Planicie Costera y Golfo de México: estudios hidrológicos; interacciones bióticas; funcionamiento del ecosistema; servicios ecosistémicos; sistemática, evolución; estudios poblacionales de flora y fauna; estudios genéticos y de conservación.
- Península de Yucatán y Caribe mexicano: inventarios de flora y fauna; efectos del cambio climático en los ecosistemas; implementación de programas de manejo; estudios para el conocimiento biológico, ecológico, económico y social, a fin de crear políticas en materia de conservación.

Es posible observar que en todas las áreas naturales protegidas se requieren todavía inventarios florísticos y faunísticos, es decir, ni siquiera se sabe a ciencia

cierta cuál es el elenco taxonómico que se encuentra en ellas.

Sin duda, la investigación sobre los ecosistemas de estas áreas será uno de los factores determinantes y definitorios en el éxito o fracaso de su creación. Por tanto, en el futuro no solo será necesario dirigir la investigación respecto de cómo se crea un área natural protegida, sino también considerar el funcionamiento del ecosistema que la conforma y, en especial, los factores que lo amenazan.

## Conclusiones

Los ecosistemas del país, como los de todo el mundo, están sujetos a una serie de factores, fenómenos y procesos que modifican su dinámica y estructura y que los hacen vulnerables a las perturbaciones. Para poder determinar la habilidad de resistencia y resiliencia que tiene un ecosistema es necesario monitorearlo y utilizar indicadores clave que reflejen su estado, así como diseñar planes de protección y conservación a través de la designación de áreas prioritarias con legislación federal o estatal. Estas estrategias se han implementado en México desde hace algunos años, aunque de manera aislada y muy focalizada en ciertas regiones. El análisis realizado mostró que el conocimiento sobre el monitoreo ambiental y uso de indicadores es todavía escaso, aunque estos tienen un alto potencial para ser usados, mejorados, y son ventanas de oportunidad para conocer de manera detallada lo que ocurre en los ecosistemas.

Al parecer, los ecosistemas que tienen un valor estético importante o que representan sitios de alto valor económico, por las actividades que en ellos se realizan (arrecifes coralinos, playas, bosques), son

los que reciben la mayor atención. Sin embargo, es necesario voltear hacia los ecosistemas poco visibles pero con una gran relevancia en el contexto ecológico, como las zonas bajas inundables, los manglares, las

dunas costeras o el bosque mesófilo de montaña, y no dejar de utilizar variables bióticas y abióticas que nos acerquen a la comprensión de los factores que afectan a los ecosistemas. ●

## Literatura citada

- Abarca, F.J. 2007. “Técnicas para evaluación y monitoreo del estado de los humedales y otros ecosistemas acuáticos”. En: Ó. Sánchez *et al.* (eds.), *Perspectivas sobre la conservación de ecosistemas acuáticos en México*. México, Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), pp. 113-144.
- Abbot, J. e I. Guijt. 1998. *Changing views on change: participatory approaches to monitoring the environment*. Londres, International Institute for Environment and Development.
- Acosta González, G. *et al.* 2013. “Additive diversity partitioning of fish in a Caribbean coral reef undergoing shift transition”. *PLOS ONE* 8 (6): e65665.
- Aguirre Macedo, M.L. *et al.* 2008. “Ballast water as a vector of coral pathogens in the Gulf of Mexico: the case of the Cayo Arcas coral reef”. *Marine Pollution Bulletin* 56 (9): 1570-1577.
- Alfsen, K.H. y H.V. Sæbø. 1993. “Environmental quality indicators: background, principles and examples from Norway”. *Environmental & Resource Economics* 3 (5): 415-435.
- Álvarez Legorreta, T., G. Gold Bouchot, y O. Zapata Pérez. 1994. “Hydrocarbon concentrations in sediments and clams (*Rangia cuneata*) in Laguna de Pom, Mexico”. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 52 (1): 39-45.
- Álvarez Silva, C. y S. Gómez Aguirre. 1994. “*Labidocera aestiva* and *L. scotti* in Tamiahua Lagoon, Veracruz, Mexico”. *Hydrobiologia* 292/293: 265-269.
- Arias-González, J.E., P. Legendre, y F.A. Rodríguez Zaragoza. 2008. “Scaling up beta diversity on Caribbean coral reefs”. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 366 (1-2): 28-36.
- Arias-González, J.E. *et al.* 2011. “Reefscape proxies for the conservation of Caribbean coral reef biodiversity”. *Ciencias Marinas* 37 (1): 87-96.
- Ávila Serrano, G.E. *et al.* 2006. “Distribución de la macrofauna intermareal del delta del río Colorado, norte del Golfo de California, México”. *Ciencias Marinas* 32 (4): 649-661.
- Baqueiro Cárdenas, E.R. *et al.* 2007. “Variations in the reproductive cycle of the oyster *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791), Pueblo Viejo lagoon, Veracruz, Mexico”. *Transitional Waters Bulletin* 2: 37-46.
- Bastida Zavala, J.R. 1993. “Taxonomía y composición biogeográfica de los poliquetos (Annelida: Polychaeta) de la bahía de La Paz, B.C.S., México”. *Revista de Investigación Científica* 4 (1): 11-39.
- Bellon, M.R. *et al.* 2008. “Diversidad y conservación de recursos genéticos en plantas cultivadas”. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), *Capital natural de México*, vol. II, *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, Conabio, pp. 355-382.
- Berman, J.M. y C.A. Francis. 2006. “Diversity of ammonia-oxidizing Archaea and Bacteria in the sediments of a hypernutrified subtropical estuary: Bahía del Tobarí, Mexico”. *Applied and Environmental Microbiology* 72 (12): 7767-7777.
- Bezaury Creel, J. y D. Gutiérrez Carbonell. 2009. “Áreas naturales protegidas y desarrollo social en México”. En: Conabio, *Capital natural de México*, vol. II, *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, Conabio, pp. 385-431.
- Botello, A.V. *et al.* 1994. “Organochlorine compounds in oysters and sediments from coastal lagoons of the Gulf of Mexico”. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 53 (2): 238-245.
- Botello, A.V., L.G. Calva B. y G. Ponce V. 2001. “Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from coastal lagoons of Veracruz state, Gulf of Mexico”. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 67 (6): 889-897.
- Bozec, Y.M. *et al.* 2008. “Impacts of coastal development on ecosystem structure and function of Yucatan coral reefs, Mexico”. *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium*, vol. II, pp. 691-695.
- Brock, W.A. *et al.* 2009. “Modelling biodiversity and ecosystem service in coupled ecological-economic systems”. En: S. Naeem *et al.* (eds.), *Biodiversity, ecosystem functioning, & human wellbeing: an ecological and economic perspective*. Nueva York, Oxford University Press, pp. 263-278.
- Burger, J. 2006. “Bioindicators: a review of their use in the environmental literature 1970-2005”. *Environmental Bioindicators* 1 (2): 136-144.

- Cáceres, M. de, *et al.* 2012. "Using species combinations in indicator value analyses". *Methods in Ecology and Evolution* 3 (6): 973-982.
- Calva Benítez, L.G. y R. Torres Alvarado. 2000. "Distribución de carbohidratos, carbono y nitrógeno orgánico en sedimentos de tres lagunas costeras del Golfo de México". *Hidrobiológica* 10: 101-114.
- Calva Benítez, L.G., A.V. Botello y G.V. Ponce Vélez. 2005. "Composición de hidrocarburos alifáticos en sedimentos de la laguna Sontecomapan, Ver., México". *Hidrobiológica* 15 (1): 97-108.
- Carreón Palau, L. *et al.* 2003. "Microhábitat y biota asociada de juveniles de abulón *Haliotis fulgens* y *H. corrugata* en bahía Tortugas, Baja California Sur, México". *Ciencias Marinas* 29 (3): 325-341.
- Carvalho, F.P. *et al.* 2009. "Pesticide and PCB residues in the aquatic ecosystems of Laguna de Terminos, a protected area of the coast of Campeche, Mexico". *Chemosphere* 74 (7): 988-995.
- Castañeda Chávez, M.R., F. Lango Reynoso y C. Landeros Sánchez. 2011. "DDT in *Crassostrea virginica* (Gmelin, 1791) of coastal lagoons in the Gulf of Mexico". *Journal of Agricultural Science* 3 (1): 183-193.
- Challenger, A. y J. Soberón. 2008. "Los ecosistemas terrestres". En: Conabio, *Capital natural de México*, vol. I, *Conocimiento actual de la biodiversidad*. México, Conabio, pp. 87-108.
- Christensen, N.L. *et al.* 1996. "The report of the Ecological Society of America Committee of the scientific basis for ecosystem management". *Ecological Applications* 6 (3): 665-691.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). *Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2007-2012*. México, Conanp.
- Conanp. 2008. *Términos de referencia para la elaboración de programas de manejo de las áreas naturales protegidas competencia de la Federación*. México, Conanp.
- Conabio. 2010. *El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible*. México, Conabio.
- Contreras, E.F. 2000. "Las lagunas costeras mexicanas y su importancia para la biodiversidad". *México* 2 (1): 120-128.
- Contreras, E.F. *et al.* 1996. "Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas". *Revista de Biología Tropical* 44 (2): 417-425.
- Contreras, E.F., O. Castañeda L. y R. Torres A. 1997. "Hidrología, nutrientes y productividad primaria en las lagunas costeras del estado de Oaxaca, México". *Hidrobiológica* 7: 9-17.
- Cortés Altamirano, R. y A. Núñez Pasten. 1992. "Doce años (1979-1990) de registros de mareas rojas en la bahía de Mazatlán, Sinaloa, México". *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM* 19 (1): 113-121.
- Costello, M.J. *et al.* 2010. "A census of marine biodiversity knowledge, resources, and future challenges". *PLOS ONE* 5 (8): e12110.
- Cotler, H. 2003. "El uso de la información edáfica en los estudios ambientales". *Gaceta Ecológica* 68: 33-42.
- Cram, S. *et al.* 2006. "Assessment of trace elements and organic pollutants from a marine oil complex into the coral reef system of Cayo Arcas, Mexico". *Environmental Monitoring and Assessment* 121 (1): 127-149.
- Danielsen, F. *et al.* 2009. "Local participation in natural resource monitoring: a characterization of approaches". *Conservation Biology* 23 (1): 31-42.
- Decreto por el que se reforma y adiciona diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. 2008. México, *Diario Oficial de la Federación*, 16 de mayo.
- Díaz Ruiz, S., A. Aguirre León y O. Pérez Solís. 2000. "Distribución y abundancia de *Syngnathus louisianae* y *Syngnathus scovelli* (Syngnathidae) en la laguna de Tamiahua, Golfo de México". *Ciencias Marinas* 26 (1): 125-143.
- Domínguez Castanedo, N. *et al.* 2007. "The use of higher taxa to assess the benthic conditions in the southern Gulf of Mexico". *Marine Ecology* 28 (Suppl. 1): 161-168.
- García Hernández, V. *et al.* 2009. "Fish larvae and juveniles checklist (Pisces) from the northern Yucatan Peninsula, Mexico, with 39 new records for the region". *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80: 85-94.
- García Madrigal, M.S., R.W. Heard y E. Suárez Morales. 2005. "Records and observations of Tanaidaceans (Peracarida) from shallow waters of the Caribbean Coast of Mexico". *Crustaceana* 77 (10): 1153-1177.
- Gómez Noguera, S.E. y M.E. Hendrickx. 1997. "Distribution and abundance of meiofauna in a subtropical lagoon in the south-eastern Gulf of California, Mexico". *Marine Pollution Bulletin* 34 (7): 582-587.
- Gómez Pompa, A. y R. Dirzo (coords.). 1995. *Reservas de la biosfera y otras áreas naturales protegidas de México*. México, INE, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap).
- González Salas, C. *et al.* 2003. "Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo, Mexico (Part 3: juvenile reef fishes)".



- En: J.C. Lang (ed.), *Status of coral reefs in the western Atlantic: results of initial surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) program*. Atoll Research Bulletin 496, pp. 598-608.
- Gordon, D.R. *et al.* 2005. "The nature conservancy's approach to measuring biodiversity status and the effectiveness of conservation strategies". En: M.J. Groom *et al.* (eds.), *Principles of conservation biology*. Sunderland, MA, Sinauer Associates, pp. 688-694.
  - Heink, U. e I. Kowarik. 2010. "What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning". *Ecological Indicators* 10 (3): 584-593.
  - Hernández Landa, R.C. *et al.* 2015. "Spatial distribution of surgeonfish and parrotfish in the northern sector of the Mesoamerican Barrier Reef System". *Marine Ecology* 36 (3): 432-446.
  - Hughes, G. y L.V. Madden. 2003. "Evaluating predictive models with application in regulatory policy for invasive weeds". *Agricultural Systems* 76 (2): 755-774.
  - Jordán Dahlgren, E., M. Maldonado y R.E. Rodríguez Martínez. 2005. "Diseases and partial mortality in *Montastraea annularis* species complex in reefs with differing environmental conditions (NW Caribbean and Gulf of Mexico)". *Diseases of Aquatic Organisms* 63 (1): 3-12.
  - Kwandras, J. *et al.* 1998. "Use of benthic diatom communities to evaluate water quality in rivers of southern Poland". *Journal of Applied Phycology* 10 (2): 193-201.
  - Lanza Espino, G. de la, y H. Lozano Montes. 1999. "Comparación fisicoquímica de las lagunas de Alvarado y Términos". *Hidrobiológica* 9 (1): 15-29.
  - Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1988. México, *Diario Oficial de la Federación*, 28 de enero.
  - Leyva Cardoso, D.O. *et al.* 2003. "Persistent organochlorine pesticides in coastal sediments from Petacalco Bay, Guerrero, Mexico". *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 71 (6): 1244-1251
  - López Ridaura, S., O. Masera y M. Astier. 2002. "Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. The MESMIS framework". *Ecological Indicators* 2 (1-2): 135-148.
  - Maass, M. *et al.* 2010. "Las áreas naturales protegidas y la investigación ecológica de largo plazo en México". *Ecosistemas* 19 (2): 69-83.
  - Manzanilla Domínguez, H. y R. Gasca. 2004. "Distribution and abundance of *Phyllosoma* larvae (Decapoda, Palinuridae) in the southern Gulf of Mexico and the Western Caribbean Sea". *Crustaceana* 77 (1): 75-93.
  - Martínez López, A., A.E. Ulloa Pérez y D.C. Escobedo Urias. 2007. "First record of vegetative cells of *Pyrodinium bahamense* (Gonyaulacales: Goniodomataceae) in the Gulf of California". *Pacific Science* 61 (2): 289-293.
  - McDonald, L.H. y A. Smart. 1993. "Beyond the guidelines: practical lessons for monitoring". *Environmental Monitoring and Assessment* 26 (2): 203-218.
  - Meijers, E.M.J. 1986. "Defining confusions-confusing definitions". *Environmental Monitoring and Assessment* 7 (2): 157-159.
  - Mittermeier, R. y C. Goettsch. 1992. "La importancia de la diversidad biológica de México". En: J. Sarukhán y R. Dirzo (comps.), *México ante los retos de la biodiversidad*. México, Conabio, pp. 57-62.
  - Mittermeier, R.A., C. Goettsch Mittermeier y P. Robles Gil. 1997. *Megadiversidad: los países biológicamente más ricos del mundo*. México, Cementos Mexicanos (Cemex) y Agrupación Sierra Madre.
  - Montaña Ley, Y., R. Peraza Vizcarra y F. Páez Osuna. 2008. "Tidal hydrodynamics and their implications for the dispersion of effluents in Mazatlán harbor: an urbanized shallow coastal lagoon". *Water, Air, and Soil Pollution* 194 (1): 343-357.
  - National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Data Buoy Center (NDBC) (<http://www.ndbc.noaa.gov/obs.shtml>) Proyecto Establecimiento de Línea de Base en Aguas Profundas del Golfo de México en Respuesta al Derrame Petrolero Asociado a la Plataforma Deepwater Horizon.
  - Núñez Lara, E. y E. Arias-González. 1998. "The relationship between reef fish community structure and environmental variables in the southern Mexican Caribbean". *Journal of Fish Biology* 53 (Suppl. A): 209-221.
  - Núñez Lara, E. *et al.* 2003. "Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo, Mexico (Part 2: reef fishes)". En: J.C. Lang (ed.), *Status of coral reefs in the western Atlantic: results of initial surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) program*. Atoll Research Bulletin 496, pp. 318-337.

- Núñez Lara, E., J.E. Arias-González y P. Legendre. 2005. "Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: testing models using a multi-scale survey design". *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 324 (2): 157-169.
- Ochoa, J.L., E. Núñez Vázquez y J. Saad. 2003. "Diferentes términos utilizados para describir las 'mareas rojas'". *Revista de Biología Tropical* 51 (3-4): 621-628.
- Parr, T.W. *et al.* 2002. "Towards a long-term integrated monitoring programme in Europe: network design in theory and practice". *Environmental Monitoring and Assessment* 78 (3): 253-290.
- Pech, D., P. Ardisson y N. Hernández. 2007. "Benthic community response to habitat variation: a case of study from a natural protected area, the Celestun coastal lagoon". *Continental Shelf Research* 27 (20): 2523-2533.
- Pech, D. *et al.* 2009. "The checkered puffer (*Sphoeroides testudineus*) and its helminths as bioindicators of chemical pollution in Yucatan coastal lagoons". *Science of the Total Environment* 407 (7): 2315-2324.
- Petróleos Mexicanos (Pemex) y Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). *Proyecto integral de mediciones oceanográficas* <http://cicese-pemex.cicese.mx/webdb/pub/index.php?mod=ini>.
- Rivera V. y R. Twilley. 1996. "The relative role of denitrification and immobilization in the fate of inorganic nitrogen in mangrove sediments (Terminos Lagoon, Mexico)". *Limnology and Oceanography* 41 (2): 284-296.
- Rodríguez Figueroa, G.M., E. Shumilin e I. Sánchez Rodríguez. 2009. "Heavy metal pollution monitoring using the brown seaweed *Padina durvillae* in the coastal zone of the Santa Rosalía mining region, Baja California Peninsula, Mexico". *Journal of Applied Phycology* 21: 19-26.
- Rodríguez Martínez, R.E. *et al.* 2010. "Environmental state and tendencies of the Puerto Morelos CARICOMP site, Mexico". *Revista de Biología Tropical* 58 (Suppl. 3): 23-43.
- Rodríguez Zaragoza, F.A. y J.E. Arias-González. 2008. "Additive diversity partitioning of reef fishes across multiple spatial scales". *Caribbean Journal of Science* 44 (1): 90-101.
- Román Contreras, R. y M. Martínez Mayén. 2010. "Palaemonidae (Crustacea: Decapoda: Caridea) from the shallow waters from Quintana Roo, Mexican Caribbean coast". *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 43-51.
- Ruiz Fernández, A.C. *et al.* 2009. "Trace metals (Cd, Cu, Hg, and Pb) accumulation recorded in the intertidal mudflat sediments of three coastal lagoons in the Gulf of California, Mexico". *Estuaries and Coasts* 32 (3): 551-564.
- Ruiz Zárate, M.A. *et al.* 2003. "Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: stony corals and algae)". En: J.C. Lang (ed.), *Status of coral reefs in the western Atlantic: results of initial surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) program*. Atoll Research Bulletin 496, pp. 318-337.
- Rzedowski, J. 2006. *Vegetación de México*. 1.ª ed. digital. México, Conabio.
- Salas Pérez, J.J. y V. Arenas Fuentes. 2011. "Winter water mass of the Veracruz Reef System". *Atmósfera* 24 (2): 221-231.
- Salazar Coria, L., I. Schifter y C. González Macías. 2010. "Weighing the evidence of ecological risk from PAHs contamination in the estuarine environment of Salina Cruz Bay, Mexico". *Environmental Monitoring and Assessment* 162 (1-4): 387-406.
- Sánchez Colón, S. *et al.* 2009. "Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas". En: Conabio, *Capital natural de México*, vol. II, *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México, Conabio, pp. 75-129.
- Soto Jiménez, M. *et al.* 2008. "Lead pollution in subtropical ecosystems on the SE Gulf of California coast: a study of concentrations and isotopic composition". *Marine Environmental Research* 66 (4): 451-458.
- Tapia González, F.U., J.A. Herrera Silveira y M.L. Aguirre Macedo. 2008. "Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical coastal lagoons of the Yucatán Peninsula". *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 76 (2): 418-430.
- Toledo, T. 2009. "El bosque de niebla". *Biodiversitas* 83: 1-6.
- Torres Alvarado, M.R. *et al.* 2006. "Dinámica de las bacterias anaeróbicas en las fases terminales de la mineralización de la materia orgánica en el sedimento de los ecosistemas Carretas-Pereyra y Chantuto-Panzacola". *Hidrobiológica* 16 (2): 183-196.
- Trejo, I. 1996. "Características del medio biofísico de la selva baja caducifolia en México". *Investigaciones Geográficas* núm. especial 4: 95-110.
- Varona Cordero, F., F.J. Gutiérrez Mendieta y M.E. Meave del Castillo. 2010. "Phytoplankton assemblages in two compartmentalized coastal

- tropical lagoons (Carretas-Pereyra and Chantuto-Panzacola, Mexico)". *Journal of Plankton Research* 32 (9): 1283-1299.
- Williams, J. *et al.* 2001. *Biodiversity, Australia state of the environment report 2001 (Theme report)*. Canberra, Australia, Department of Environment and Heritage, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO).
  - Young, M.B. *et al.* 2008. "Characterizing sources of groundwater to a tropical coastal lagoon in a karstic area using radium isotopes and water chemistry". *Marine Chemistry* 109 (3-4): 377-394.
  - Conanp. 2015. [http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos)
  - National Academy of Sciences <[www.nasonline.org](http://www.nasonline.org)> (consultada en junio de 2011).
  - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales <[www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)> (consultada en junio de 2011).