

Enrique J. Jardel
Manuel Maass
V́ctor H. Rivera-Monroy
(coords.)

La investigación ecológica a largo plazo en México

Universidad de Guadalajara
Centro Universitario
de la Costa Sur

Red Mexicana de Investigación
Ecológica a Largo Plazo



EDITORIAL
UNIVERSITARIA

LA INVESTIGACIÓN ECOLÓGICA
A LARGO PLAZO EN MÉXICO



Itzcóatl Tonatiuh Bravo Padilla
Rectoría General

Miguel Ángel Navarro Navarro
Vicerrectoría Ejecutiva

José Alfredo Peña Ramos
Secretaría General

Alfredo Tomás Ortega Ojeda
Rectoría del Centro Universitario de la Costa Sur

Primera edición, 2013

D.R. © 2013, Universidad de Guadalajara
Centro Universitario de la Costa Sur
Av. Independencia Nacional 151
CP 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México
imecbio@cucsur.udg.mx
www.cucsur.udg.mx

ISBN: 978-607-450-755-3

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta del contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización por escrito de los titulares de los derechos, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y, en su caso, de los tratados internacionales aplicables.

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

LA INVESTIGACIÓN ECOLÓGICA A LARGO PLAZO EN MÉXICO

ENRIQUE J. JARDEL
MANUEL MAASS
VÍCTOR H. RIVERA-MONROY
(Editores)

AUTORES

ENRIQUE J. JARDEL, J. MANUEL MAASS, VÍCTOR HUGO RIVERA,
GERARDO CEBALLOS, RODRIGO MEDELLÍN, MIGUEL EQUIHUA ,
ARMANDO EQUIHUA, LUCINA HERNÁNDEZ, RICARDO AYALA,
JAVIER ALCOCER DURAND, JOSÉ TULIO ARREDONDO, JAVIER ÁLVAREZ
SÁNCHEZ, LUIS EDUARDO CALDERÓN, ALICIA CASTILLO, JOSÉ G.
GARCÍA FRANCO, ENRIQUE GODÍNEZ, JORGE A. HERRERA SILVEIRA,
ELIZABETH HUBER SANNWALD, LUIS IGNACIO ÍÑIGUEZ, JORGE A.
LÓPEZ-PORTILLO, ANGELINA MARTÍNEZ YRÍZAR, MARISELA PANDO,
LUCIANA PORTER BOLLAND, HÉCTOR REYES BONILLA, VÍCTOR HUGO
REYNOSO, MARTIN RICKER, LAURA M. SCOTT

Prólogo de José Sarukhán



Red Mexicana de Investigación
Ecológica a Largo Plazo



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
Centro Universitario de la
Costa Sur

Contenido

PRÓLOGO	7
<i>José Sarukhán</i>	
AGRADECIMIENTOS	9
RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES	17
2.1. ¿Por qué investigación ecológica a largo plazo?	17
2.2. Aplicaciones de la investigación ecológica a largo plazo	21
2.3. Los orígenes de la investigación ecológica a largo plazo	22
2.4. Relevancia para México	25
3. LA RED MEXICANA DE INVESTIGACIÓN ECOLÓGICA DE LARGO PLAZO	27
3.1. Origen de la Red MEX-LTER	27
3.2. La misión de la Red MEX-LTER	30
3.3. Objetivos	30
3.4. Estructura y operación	31
4. MARCO CONCEPTUAL	37
4.1. La agenda de investigación de la Red MEX-LTER	37
4.2. Descripción de las áreas temáticas	40
4.3. Líneas de monitoreo	81
4.4. Gestión de la información.	91

5.	GRUPOS Y SITIOS DE TRABAJO DE LA RED MEX-LTER	93
5.1.	Alchichica	93
5.2.	Arrecifes del Pacífico	96
5.3.	Chamela	99
5.4.	Ecosistemas del altiplano	107
5.5.	Ecosistemas costeros de Jalisco y Colima.	110
5.6.	Ecosistemas Costeros de la Península de Yucatán	113
5.7.	Gracilis	117
5.8.	Los Tuxtlas.	119
5.9.	Mapimí	123
5.10.	Sierra de Manantlán	127
5.11.	La Mancha	132
5.12.	Miembros con categoría de individuos	135
6.	CONSIDERACIONES FINALES	139
	LITERATURA CITADA	143
	ACERCA DE LOS AUTORES.	177

Prólogo

Poco a poco, la idea de que los recursos naturales renovables constituyen un patrimonio social (realmente un capital *natural* comparable a otros capitales de una nación) ha ido tomando presencia en el discurso del desarrollo de muchos países y aunque en la mayoría de ellos aún no es un componente adecuada y regularmente valorado en las cuentas nacionales, hay cada vez más signos de que esto empieza a ocurrir.

De igual manera que es necesario entender de finanzas y economía para dominar todos los aspectos del manejo del capital económico o financiero de un país, es requisito tener un buen conocimiento del capital natural de una nación para conservarlo, mejorarlo y usarlo sustentablemente.

El capital natural nos provee de servicios (los servicios ecosistémicos) que son indispensables para el mantenimiento, no solamente de las condiciones de bienestar de nuestra especie, sino de la vida misma como la conocemos en este planeta. Tales servicios (captura de CO₂ atmosférico, mantenimiento del ciclo hidrológico normal que permite la disponibilidad del agua potable de forma permanente, polinización de los cultivos de los que vivimos, etc.) resultan de una serie de procesos ecológicos y de una estructura y composición de tales ecosistemas, que son en su mayoría poco conocidos y varían espacial y temporalmente. Tal variación está ligada a la diversidad de los componentes de los ecosistemas, a la variabilidad ecológica espacial y tem-

poral del territorio, a la historia de su uso y a las diferentes formas de interacción entre las sociedades y los ecosistemas.

Avanzar en el conocimiento y comprensión de los procesos responsables de que los servicios ecosistémicos se mantengan de manera relativamente estable implica entender la dinámica espacial y temporal de esos procesos. Eso significa contar con estudios de larga duración y de una complejidad que requiere de grupos numerosos y de diferentes disciplinas —incluidas desde luego las disciplinas sociales— que trabajan juntos de manera permanente y con un enfoque integral de los ecosistemas, no solamente en unos cuantos elementos constitutivos de los ecosistemas, sean estos físicos o biológicos. Muy pocos elementos de los sistemas institucionales-académicos donde la gente lleva a cabo su investigación, están orientados de tal manera que las anteriores condiciones se produzcan de manera natural y regular.

La investigación de las interacciones entre sociedades y los ecosistemas que son objeto de prácticas de uso o conservación demanda una nueva conceptualización de la forma de hacer investigación, requiere de innovación en la manera en que los grupos de investigación se conforman y trabajan juntos por largos periodos, así como de los criterios y parámetros de valoración académica de los productos de esa investigación multidisciplinaria, que aseguren que se realiza en niveles de alta calidad científica y pertinencia social.

La filosofía que constituye el basamento de los estudios LTER (por las siglas en inglés de *Long Term Ecological Research*) ha surgido como una respuesta internacional a la necesidad de abordar la complejidad de los estudios de la interacción entre sistemas sociales y ecológicos, incorporando no sólo la idea de extender la temporalidad de los proyectos, sino de incluir los siguientes aspectos importantes:

- a) estandarizar las metodologías que permitan comparar resultados entre grupos de investigación;
- b) implementar un proceso continuo de formación de recursos humanos;
- c) promover el resguardo adecuado y de largo plazo de las bases de datos generadas;
- c) usar las nuevas tecnologías de la información para un mayor y más eficiente manejo y distribución de la información generada;
- d) asegurar que la información llegue clara y oportunamente a los tomadores de decisiones, tanto en organismos gubernamentales como en sectores de la sociedad civil.

La Red Mexicana de Investigación Ecológica de Largo Plazo (MEX-LTER), fue concebida en buena medida con el propósito de ayudar a resolver algunas de las limitaciones existentes a la realización del tipo de investigación antes referido. Al establecer dicha red, los científicos mexicanos que trabajan en las áreas pertinentes de las ciencias sociales y las naturales, han mostrado de manera clara su interés y disposición para abordar, de manera coordinada, el tipo de estudios realizados con el detalle y a las escalas espaciales y temporales que se requieren para la investigación entre los sistemas sociales y los naturales; un tema que ya tiene una posición central en las discusiones respecto a la forma como los países pueden o no dirigirse hacia la sustentabilidad en su desarrollo.

La experiencia de la MEX-LTER no sólo ha sido clave en la estimulación e implementación de redes científicas interdisciplinarias en el país—como lo ha sido su activa participación en la conformación de las redes temáticas de Conacyt— sino también ha tenido un papel muy destacado en los trabajos de cristalización de la Red Internacional LTER.

Aparte de la importancia que los estudios locales de larga duración acerca de la forma como las diferentes sociedades utilizan los recursos naturales a su alcance, habría que concebir a la Red MEX-LTER como un gran instrumento de medición a escala nacional, que permite abordar problemas de investigación científica de naturaleza ambiental y que requieren esfuerzos coordinados en muchos sitios y por tiempo prolongado y cuya integración a escala nacional es necesaria. El potencial de colaboración ofrecido por este tipo de esfuerzos es enorme.

El presente libro propone las bases conceptuales y metodológicas para el estudio de procesos ecológicos a grandes escalas temporales y espaciales. Describe los antecedentes que dieron origen al enfoque de investigación ecológica a largo plazo en el mundo, así como el proceso de formación de la red mexicana. Se discute una agenda de investigación, describiendo varias de sus áreas temáticas, la relación entre las sociedades humanas y la naturaleza y la definición de criterios para el manejo de ecosistemas. Igualmente se describen las líneas de monitoreo que aborda la Red MEX-LTER, así como los mecanismos para la gestión de la información en los sitios de estudio.

En el conjunto de los capítulos no sólo se muestra la ruta de acciones que más de un centenar de científicos bien organizados y con una misión clara han ideado para abordar el problema de generar conocimiento a escalas amplias, sino también la consistencia en el esfuerzo y el tiempo que proyectos de esta naturaleza requieren en cuanto a un trabajo colaborativo, consensuado, sintonizado, en muchos lugares y de manera sostenida por mucho años.

Por la experiencia de quienes han escrito los capítulos y por la trascendencia del concepto de investigación interdisciplinaria de largo plazo, es de esperar que esta obra tenga una influencia importante en el desarrollo de investigaciones interdisciplinarias de alta calidad en el campo de la relación de las sociedades con sus recursos naturales.

José Sarukhán
México, DF, abril de 2011

Agradecimientos

Durante el proceso de formación de la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER) y en el desarrollo de sus actividades a partir de su formación en 2004, se ha contado con el apoyo de diversas instituciones entre las que destacan el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Instituto de Ecología A.C. (INECOL). La Universidad de Guadalajara, a través del Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR), apoyó esta la publicación a través del Programa Institucional de Fomento a la Investigación (PIFI-2008-14MSU0010Z-11).

La elaboración de este libro no hubiera sido posible sin la valiosa colaboración de los integrantes de los grupos y los miembros individua-

les de la Red MEX-LTER, a través de sus contribuciones en los talleres de las reuniones nacionales.

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a los integrantes de la Comisión Dictaminadora de la Red MEX-LTER Elva Escobar, Exequiel Ezcurra, Arturo Gómez-Pompa, Daniel Lluch, José Sarukhán, Robert Waide y Don Wilson, así como al personal que ha formado parte de la oficina de la Red MEX-LTER, Ana Burgos, Lyliana Rentería, Socorro Lara y Sandokán Barajas, así como a Oscar Cárdenas Hernández. Jorge A. Benítez Torres apoyó el proceso editorial. Paulina Llamas colaboró en la revisión del manuscrito y la integración de la bibliografía. Se agradece de manera especial a Alfredo T. Ortega Ojeda, Secretario Académico del CUCSUR el haber facilitado las gestiones del financiamiento para la publicación de este libro, así como a Emmanuel Carballo Villaseñor y a Ediciones de la Noche por el trabajo editorial.

Resumen

La ecología es una ciencia que tiene un papel esencial en la generación de conocimiento y entendimiento de patrones y procesos que constituyen el fundamento de la gestión ambiental, la conservación de la diversidad biológica y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Frente al cambio ambiental global, se espera que este campo del conocimiento aporte información, modelos, principios, criterios e indicadores útiles para entender el funcionamiento de los ecosistemas y las interacciones entre la sociedad y la naturaleza, con el propósito de mantener a largo plazo los “sistemas de soporte de vida” de los cuales depende el sustento de las sociedades humanas. En un país considerado como uno de los que albergan mayor diversidad biológica en el mundo, y que al mismo tiempo enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, la aplicación de la ecología resulta particularmente relevante. Como parte del proceso para enfrentar este desafío, se ha conformado la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER). Esta red ha sido el resultado de un amplio esfuerzo de investigadores de varias instituciones del país y colaboradores del extranjero, para avanzar en el desarrollo de la ciencia de la ecología y su aplicación en México. En este libro se presentan los antecedentes que dieron origen al enfoque de investigación ecológica a largo plazo en el mundo, su relevancia para México y cómo fue el proceso de formación de la

red mexicana, planteando el marco conceptual que ha servido como base para su diseño y operación. Las áreas temáticas que conforman la agenda de investigación de la Red MEX-LTER son descritas; éstas incluyen el estudio de procesos como la productividad primaria, la dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas, el papel de la biodiversidad y la influencia de regímenes de perturbación en los procesos ecológicos, las consecuencias del cambio climático, las interacciones e interfases de ecosistemas naturales y transformados, la relación entre las sociedades humanas y la naturaleza y la definición de criterios para el manejo de ecosistemas. También se describen las líneas de monitoreo que aborda la red (clima, hidrología, substrato y suelos, flujos de energía y materiales, biodiversidad y poblaciones, productividad primaria y dinámica del paisaje y el uso del suelo), así como los mecanismos para la gestión de la información en los sitios de estudio y en el trabajo en red. Por último, se hace una descripción de las labores que realizan los grupos y miembros individuales de la red, cuyo trabajo abarca los temas señalados en distintos tipos de ecosistemas terrestres y acuáticos de México. Se espera que los temas que aquí se presentan generen un proceso de análisis que permita ir construyendo un enfoque de trabajo dirigido al conocimiento, valorización y conservación del rico patrimonio natural de México.

1

Introducción

El mundo en que vivimos está atravesando por un acelerado proceso de transformación ambiental. En el último siglo, las actividades humanas han generado cambios en los paisajes y ecosistemas del planeta sin precedentes en la historia de nuestra especie (MacNeill, 2000; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Este proceso de cambio ambiental global (Vitousek, 1992) ha generado una preocupación creciente acerca de las consecuencias de la modificación y desestabilización de los sistemas biofísicos y las condiciones ambientales de la Tierra, que pueden ser deletéreos o incluso catastróficos para el bienestar humano (Rockström *et al.*, 2009).

El cambio ambiental global consiste en el conjunto de transformaciones generadas por la influencia humana, a escala planetaria, en las envolturas fluidas como la atmósfera y los océanos (los sistemas de circulación física del aire, el agua y la energía) y en los ciclos biogeoquímicos globales del agua, el carbono y nutrientes, junto con otros cambios que, aunque ocurren a escalas locales o regionales, se agregan generando efectos globales, como las emisiones producidas por la quema de combustibles fósiles y biomasa que alteran la química y propiedades físicas de la atmósfera, los cambios en los usos del suelo por la expansión de la frontera agrícola y la urbanización, la sobreexplotación de recursos naturales a

tasas que superan su capacidad de regeneración, la erosión y degradación de los suelos, la pérdida de hábitats naturales y diversidad biológica, el agotamiento de fuentes de agua y la modificación de los sistemas hidrológicos por el uso del agua y las obras hidráulicas, la contaminación del aire y el agua por las descargas de residuos industriales, urbanos y agrícolas, etc. (Vitousek *et al.*, 1997; Millenium Ecosystem Assessment, 2005). Algunas de las consecuencias más críticas de estos procesos se traducen en problemas globales como el cambio climático (Munasinghe & Swart, 2005; IPCC, 2007), la acidificación de los océanos (Guinotte & Fabry, 2008; Doney *et al.*, 2009), el adelgazamiento de la capa de ozono estratosférico (Smith *et al.*, 1992), o la pérdida de biodiversidad (Chapin *et al.*, 2000). La presión humana en el sistema planetario está traspasando los límites de las condiciones ambientales que han predominado en los últimos diez mil años y en las cuales ha prosperado nuestra especie (Rockström *et al.*, 2009).

Las causas del cambio ambiental global son complejas y están profundamente arraigadas en el sistema económico y la cultura de la civilización contemporánea (Sachs, 1993; Tognetti *et al.*, 1995; Toledo, 1996; Leff, 1998). Una cuestión fundamental para enfrentar la crisis provocada por el deterioro ambiental, tanto a nivel global como local, es el conocimiento y entendimiento

de cómo funcionan los ecosistemas y cómo están cambiando por la influencia humana (Lubchenco *et al.*, 1991; Lubchenco, 1998; Herrick & Sarukhán, 2007). Este es el campo de estudio de la ecología, la ciencia que estudia las interacciones de los seres vivos entre sí y la totalidad de los factores biológicos y físicos que los afectan o son influidos por ellos (Pianka, 1974).

La ecología ha tenido un rápido desarrollo en los últimos 50 años. Este progreso ha sido el resultado no sólo de la curiosidad científica dirigida a entender el *oikos* —la “casa” o “el lugar donde se vive”— sino también de la relevancia social que tiene el conocimiento de los sistemas ecológicos que constituyen el ambiente humano, frente a los procesos de cambio ambiental. Estos procesos afectan la capacidad de los ecosistemas para proveer a las sociedades humanas de recursos como agua, alimentos y materias primas diversas, así como sus funciones de regulación del clima, la calidad del aire y el agua, y en general, de las condiciones que hacen posible la vida en la Tierra. La degradación de los ecosistemas afecta también a elementos del entorno humano que representan valores culturales, espirituales y estéticos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Los ecosistemas constituyen los “sistemas de soporte de vida”, ya que de sus funciones depende la existencia humana en el planeta (Odum, 1959), y su alteración constituye una seria amenaza para las condiciones de vida de los seres humanos. En consecuencia, a nivel local, nacional e internacional, se han desarrollado un conjunto de instrumentos de gestión ambiental orientados a la contención y remediación de los procesos de deterioro, al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la conservación de los espacios silvestres, el ordenamiento del territorio, el control de los factores de degradación ambiental, la restauración o rehabilitación de áreas degradadas y la modificación de patrones de desarrollo socioeconómico insustentables. La aplicación de estos instrumentos requiere de información, conocimiento y entendimiento de las condiciones ambientales, los patrones y procesos ecológicos y las interacciones entre las sociedades humanas y la naturaleza.

La ciencia de la ecología desempeña un papel fundamental en la gestión ambiental y el

manejo racional de los recursos naturales de la Tierra y en el mantenimiento de los sistemas de soporte de vida de los cuales dependen las sociedades humanas (Lubchenco *et al.*, 1991). Frente al deterioro ambiental, se espera que dicho campo del conocimiento aporte información, modelos, principios, criterios e indicadores útiles para entender los patrones y procesos ecológicos, el funcionamiento de los ecosistemas y las interacciones entre la sociedad y la naturaleza, contribuyendo a fundamentar la política ambiental y el manejo de los ecosistemas y los recursos naturales.

La investigación ecológica aborda el estudio de diversos niveles de organización, desde los organismos individuales y las poblaciones en relación con su ambiente, hasta las interacciones entre especies en las comunidades bióticas, los flujos de energía y ciclos de nutrientes en los ecosistemas —a escala local, regional o global— y la relación entre las sociedades humanas y los ecosistemas, adoptando diferentes enfoques —funcional, evolutivo, aplicado— y métodos de estudio —descripción y clasificación, observación continua o monitoreo de procesos, experimentación, evaluación de los efectos de las intervenciones humanas, etcétera—. Un aspecto particularmente interesante de la ecología es que muchas de las preguntas de conocimiento básico constituyen al mismo tiempo interrogantes cuya respuesta es indispensable para fines aplicados o prácticos de la gestión ambiental y el manejo de los recursos naturales. De hecho, los rápidos cambios que están ocurriendo en los ecosistemas han borrado cualquier distinción previa entre investigación básica y aplicada (Chapin *et al.*, 2002).

La investigación ecológica en México tiene un origen relativamente reciente; aunque pueden encontrarse antecedentes de estudios sobre el medio ambiente, la biota e incluso el deterioro ecológico en los trabajos de naturalistas como José Antonio Alzate o Alejandro de Humboldt, los primeros estudios ecológicos en nuestro país, como tales, se inician en la década de los años 1950 y no es hasta los años setenta cuando surgen centros de investigación dedicados a esta ciencia (Sarukhán, 1981; Martínez-Ramos, 1994; Soberón, 1995; Toledo & Castillo, 1999; Castillo

& Toledo, 2000; Martínez-Ramos *et al.*, 2006). En un país considerado como uno de los que albergan mayor diversidad biológica en el mundo (Mittermeier *et al.*, 1997), y que al mismo tiempo enfrenta serios problemas de deterioro ambiental (Challenger, 1998; Sarukhán *et al.*, 2009), la aplicación de la ecología resulta particularmente relevante (Toledo & Castillo, 1999). Como un paso importante para enfrentar este desafío de alcance nacional, se ha conformado la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER).¹ La creación de esta red ha sido el resultado de un amplio esfuerzo de investigadores de varias instituciones del país, para avanzar en el desarrollo de la ciencia de la ecología y su aplicación en México y contribuir a enfrentar los agudos problemas ambientales presentes y futuros (Burgos *et al.*, 2007).

En este documento se presenta el marco teórico conceptual de la Red MEX-LTER y se describen las áreas temáticas y líneas de monitoreo que constituyen la agenda de investigación de dicha organización. El documento se integró a partir de la propuesta de formación de la Red MEX-LTER, la cual fue elaborada por su Comité de Creación;² posteriormente, una vez constitui-

da formalmente la red, se sometió a un proceso de revisión y discusión por los integrantes de su Comité Ejecutivo y otros miembros de la organización.

Lo que aquí se presenta no pretende ser un planteamiento definitivo acerca del marco conceptual y los temas más relevantes de la investigación ecológica a largo plazo. El propósito de elaborar este libro fue establecer ciertas bases para poner en orden las ideas y documentar el enfoque de trabajo que dio origen a la Red MEX-LTER, tratando de contribuir al desarrollo de un marco conceptual y buscando promover la discusión entre los miembros de la comunidad científica dedicada a la ecología y las ciencias ambientales en México. El libro puede servir también para que científicos, estudiantes, profesionistas, técnicos, funcionarios y otras personas interesadas en la ecología tengan a su disposición una introducción general sobre el enfoque de investigación a largo plazo, respaldada por una amplia revisión de la literatura que puede servir de entrada a este campo de estudio. Se espera que estos planteamientos iniciales generen un proceso de discusión y análisis que permita ir construyendo un enfoque de trabajo dirigido al mejor entendimiento de los patrones, procesos, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas, y a su aplicación en la atención de la agenda ambiental, el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la valorización y conservación del rico patrimonio natural de México.

1. Las siglas "LTER" se refieren a *long term ecological research* (investigación ecológica a largo plazo); debido a su uso generalizado en la red internacional, de la cual forma parte la red mexicana (véase sección 2.3), se han utilizado en el acrónimo de ésta.
2. Esta propuesta constituyó la base para la elaboración del presente documento. El Comité de Creación de la Red MEX-LTER estuvo integrado por Manuel Maass y Gerardo Ceballos (UNAM) como coordinadores, y Ricardo Ayala (UNAM), Armando Equihua (Colegio de Postgraduados), Miguel Equihua (Instituto de Ecología AC), Lucina Hernández

(Instituto de Ecología AC), Enrique Jardel (Universidad de Guadalajara) y Rodrigo Medellín (UNAM).

Antecedentes

2.1. ¿Por qué investigación ecológica a largo plazo?

La ecología estudia distintos tipos de sistemas, niveles de organización y procesos, que abarcan desde la influencia de factores ambientales en la fisiología y el comportamiento de un organismos individual o en la dinámica y la distribución de poblaciones, hasta las interacciones entre componentes bióticos (plantas, microorganismos, hongos, animales) y abióticos (radiación solar, aire, agua, minerales, roca, etc.) que dan lugar a flujos de energía, materiales e información en áreas extensas como una cuenca hidrográfica, un sistema montañoso, un lago, un estuario o el mar, o incluso al nivel del ecosistema global. El campo de interés de la ecología incluye también, desde luego, a los sistemas humanos interactuando con su ambiente, ya sea como componentes de los ecosistemas o como un factor externo que influye en la configuración y la conducta de un sistema ecológico determinado.

Los fenómenos que estudia la ecología tienen lugar a diferentes escalas espaciales y temporales (O'Neill *et al.*, 1986; O'Neill, 1989; Foster *et al.*, 1990; Allen & Hoekstra, 1992; Levin, 2000; Schneider, 2002, 2009), como se ilustra en la figura 1; en este ejemplo podemos ver que el objeto de interés de los estudios ecológicos en los bosques puede ir desde la investigación sobre la ecofisiología de la germinación de una

especie de planta en un área pequeña y en un periodo corto de tiempo hasta los cambios en la distribución de las especies en áreas geográficas extensas, a través de miles de años, como se hace en los estudios paleoecológicos. En medio de estos extremos encontramos temas de estudio que abarcan sistemas de interés que se extienden sobre varias hectáreas hasta miles de kilómetros cuadrados y procesos que ocurren en periodos que van desde décadas hasta cientos de años.

Varios de los patrones y procesos que son relevantes para el entendimiento de la dinámica y el funcionamiento de los ecosistemas, así como para la gestión ambiental y el manejo sustentable de los recursos naturales, ocurren en escalas espaciales y temporales amplias; esto es, se trata de fenómenos que tienen lugar en extensiones de cientos o miles de hectáreas o en periodos de varias décadas o inclusive siglos. Por ejemplo, en el manejo de un bosque para la producción sustentable de madera, el diseño de las intervenciones silvícolas implica conocer y entender procesos que abarcan desde la regeneración de las plantas en los claros abiertos por la corta de árboles hasta el crecimiento de estas plantas para convertirse en árboles aprovechables después de varios años; si además de producir madera el bosque es manejado considerando otros usos, como la producción de agua y la protección de cuencas y adoptando criterios de conservación de la diversidad de especies, entonces es importante conocer

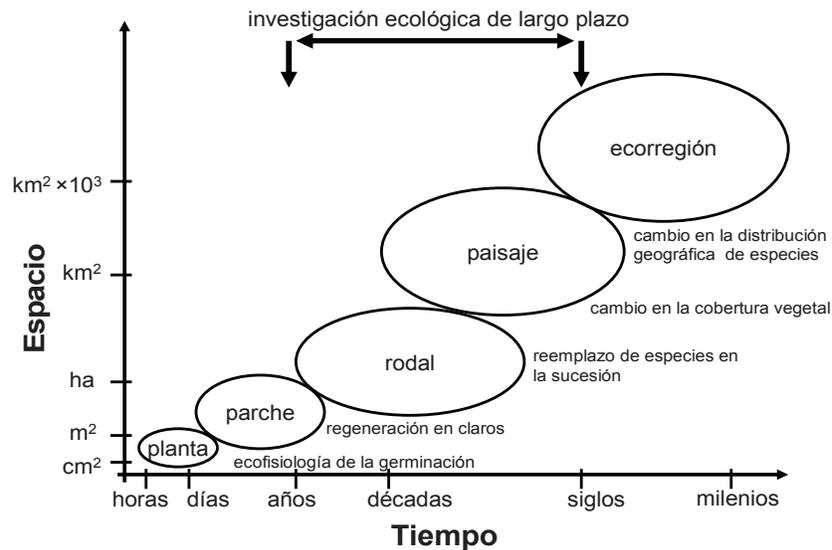


Figura 1. La ecología estudia patrones y procesos a diferentes niveles de organización y a diferentes escalas espaciales y temporales. Aquí se muestra un ejemplo correspondiente a ecosistemas forestales. Procesos como la regeneración en claros, la sucesión ecológica y los regímenes de perturbación, y los cambios en el mosaico de vegetación en el paisaje, requieren de estrategias de investigación que cubran espacios grandes y largos plazos de tiempo (tomado de Foster *et al.*, 1990, con modificaciones).

otros procesos que ocurren a través del tiempo, como el reemplazo de especies en la sucesión o a escala del paisaje, la dinámica de cambio de la cobertura vegetal y el funcionamiento del sistema hidrológico a nivel de la cuenca.

Además de esto, los ecosistemas son complejos, dinámicos y cambiantes (Botkin, 1990), lo que implica que en ellos pueden ocurrir eventos inusuales o infrecuentes, cuyos efectos y consecuencias sólo pueden ser captados en periodos de observación largos y áreas de estudio extensas (Carpenter, 1998). Así mismo, las consecuencias de la influencia humana muchas veces producen efectos sutiles que sólo se manifiestan en el largo plazo (McDonnell & Pickett, 1993). Sin embargo, la mayor parte de los estudios ecológicos generalmente abarcan unidades de estudio pequeñas y tienen una corta duración, lo cual limita el valor de sus resultados y conclusiones para explicar fenómenos de largo plazo (Tilman, 1989a; Carpenter, 1989; Likens, 1998).

La mayor parte de los estudios ecológicos publicados en la literatura científica cubren áreas relativamente pequeñas y periodos cortos de tiempo (Swanson & Sparks, 1990; Carpenter,

1998; Kareiva, 1998; Likens, 1998). Esto se atribuye a diversas razones, entre las que se pueden señalar desde los intereses de los propios investigadores o las presiones impuestas por los sistemas de evaluación de la productividad científica, hasta las restricciones de financiamiento disponible, la falta de mecanismos institucionales para asegurar la continuidad de los fondos y el mantenimiento y protección de los sitios de estudio, o el tiempo requerido para realizar una tesis de postgrado. En una revisión de más de 600 trabajos de investigación ecológica realizados durante la década de 1980 y publicados en las principales revistas científicas dedicadas a la ecología, Tilman (1989a) encontró que 85% de éstos se basaban en estudios que cubrían periodos de observación o experimentación menores a tres años. Si se considera que los fenómenos que estudia la ecología corresponden a diferentes niveles de organización y a distintas escalas de tiempo y espacio (figura 1), estos datos muestran una limitación significativa para el entendimiento de patrones y procesos que se manifiestan en grandes extensiones —que pueden abarcar desde decenas de hectáreas hasta la escala planetaria— y

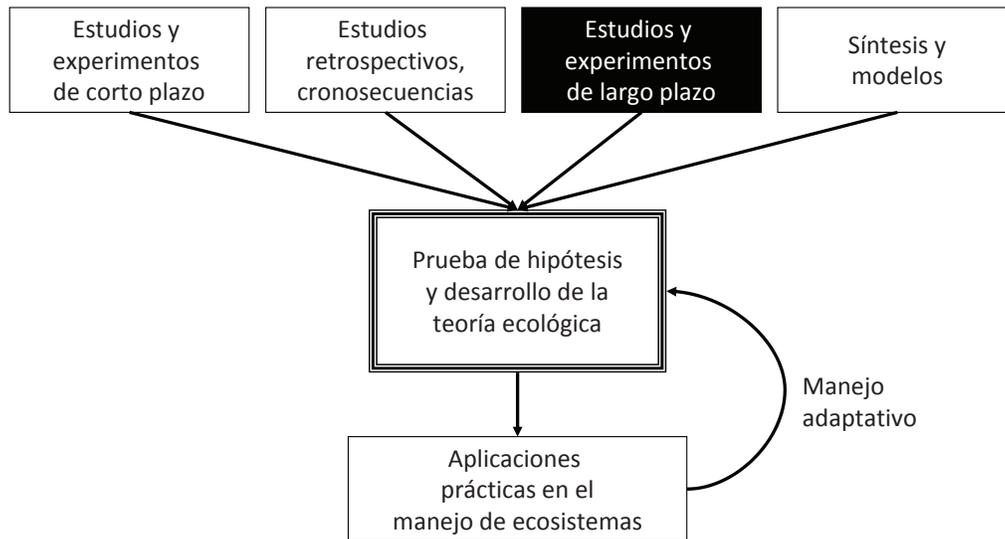


Figura 2. La investigación ecológica basada en estudios y experimentos de largo plazo, que implican la observación continua o monitoreo, es complementaria con otros enfoques de investigación ecológica, que en conjunto contribuyen a la prueba de hipótesis y al desarrollo de la teoría ecológica, que a su vez es el fundamento científico para el manejo de ecosistemas. Los estudios retrospectivos de la paleoecología y la ecología histórica pueden cubrir plazos aún más largos, pero consideran las condiciones del pasado, a diferencia de la investigación de largo plazo que se enfoca al seguimiento de procesos mientras estos ocurren. Bajo una estrategia de manejo adaptativo (Walters & Holling, 1990), la experimentación en la práctica genera nuevo aprendizaje y contribuye de manera importante al desarrollo de la teoría ecológica.

en el largo plazo, esto es, cubriendo periodos de tiempo prolongados.

En resumen, para estudiar adecuadamente fenómenos que se manifiestan a escalas espaciales y temporales amplias, y para poder detectar eventos infrecuentes y sus consecuencias, así como discernir entre la amplitud de la variación histórica y lo que son cambios eventuales o bien consecuencias de factores antropogénicos nuevos en los sistemas de interés, es necesario desarrollar estrategias y métodos de investigación ecológica a largo plazo (Gosz, 1996; Wiens, 1997; Swanson & Sparks, 1990; Symstad *et al.*, 2003). Este enfoque es complementario con otros métodos de investigación para el desarrollo de la teoría ecológica y sus aplicaciones al manejo de los ecosistemas (figura 2).

Los estudios de corta duración capturan sólo una porción de la variabilidad temporal de los fenómenos ecológicos y difícilmente pueden captar eventos raros o poco frecuentes y sus consecuencias; con ello se corre el riesgo de arribar a conclusiones incorrectas acerca del comportamiento de los sistemas ecológicos (Wiens, 1997;

Likens, 1998; Symstad *et al.*, 2003). Las múltiples escalas espaciales y temporales a las que ocurren los fenómenos ecológicos (Levin, 2000), han constituido un reto formidable para extrapolar o relacionar los resultados de estudios a corto plazo o a escalas locales con fenómenos evaluados a mayores extensiones de tiempo y espacio (Allen & Hoekstra, 1992; Ehleringer & Field, 1993; Carpenter, 1998; Likens, 1998). Frente a este reto, en muchos estudios se aplican métodos tales como el análisis de cronosecuencias, estudios retrospectivos que tratan de reconstruir patrones y procesos del pasado, o el uso de modelos de simulación (figura 2). Todos estos métodos son útiles, pero presentan limitaciones: la variabilidad inherente a los sistemas ecológicos dificulta el establecimiento de verdaderas cronosecuencias con muestras que representen réplicas adecuadas (Hulbert, 1984). La información que es posible obtener de eventos del pasado muchas veces es incompleta o fragmentaria, o bien puede ser que no cubra el registro de nuevas condiciones. Las proyecciones de modelos pueden también presentar sesgos cuando

se utilizan datos basados en series de tiempo con pocos años de registro, lo que dificulta la validación y calibración de dichos modelos ecológicos. En resumen, como sucede en general en la investigación, los enfoques metodológicos de la ecología que se muestran en la figura 2 pueden tener limitaciones, pero la complementariedad entre éstos permite avanzar en el perfeccionamiento del conocimiento ecológico.

Además de las limitaciones de los estudios realizados en periodos cortos, otro problema es el de la escala espacial que aborda la investigación ecológica. Como ya se señaló, muchos de los trabajos reportados en la literatura se han enfocado a una escala pequeña, utilizando sitios o unidades de muestreo de 1m² a 1 ha (Tilman, 1989; Swanson y Sparks, 1990; Kareiva, 1998). El enfoque de trabajo de una red de investigación ecológica a largo plazo contribuye a evaluar preguntas a una escala espacial más amplia, porque permite la comparación cruzada de los resultados locales entre diferentes sitios de estudio (Gosz, 1999), siendo un enfoque más adecuado para la investigación de varios procesos ecológicos (Swanson & Sparks, 1990). Estas consideraciones han llevado, en años recientes, al reconocimiento de la importancia de desarrollar redes que conecten a investigadores e instituciones, para realizar estudios de largo plazo en colaboración.

La investigación ecológica de largo plazo, llevada a cabo en sitios específicos, por equipos de investigadores de distintas disciplinas e instituciones, cooperando y colaborando en sus sitios de estudio o entre distintos sitios a través de redes, ha demostrado su potencial para alcanzar logros significativos, tanto en la generación de conocimiento básico y en el desarrollo de la teoría ecológica, como en la generación de resultados aplicables en la práctica (Franklin *et al.*, 1990; Golley, 1993; Gosz, 1996).

Una parte considerable del conocimiento ecológico actual, a nivel internacional, se debe a las contribuciones de estudios de largo plazo realizados en estaciones de investigación o sitios de estudio en los que ha sido posible mantener por varios años la colaboración entre equipos de investigadores de diferentes instituciones (Franklin *et al.*, 1990). Basta con señalar algunos ejemplos como la contribución de los trabajos realizados

en Hubbard Brook (Estados Unidos) para entender los ciclos de nutrientes y el efecto de la lluvia ácida en ecosistemas forestales y lagos (Bormann & Likens, 1979; Groffman *et al.*, 2004), los estudios realizados en Coweetta (Estados Unidos) (Douglas & Swank, 1975; Swank & Crossley, 1988) y en Luquillo (Puerto Rico) (Lugo, 1986) sobre las interacciones entre la cobertura forestal y el ciclo hidrológico y sus aplicaciones en el manejo forestal y la gestión de cuencas, o la contribución a la ecología de bosques tropicales de los estudios realizados en estaciones de campo como La Selva (Costa Rica) (Clark, 2002; Clark *et al.*, 2003) o Barro Colorado (Panamá) (Leigh *et al.*, 1990). En el caso de México, por citar algunos ejemplos, el desarrollo de estudios a largo plazo en estaciones de investigación como Los Tuxtlas (Veracruz), Chamela (Jalisco), el Laboratorio del Desierto en Mapimí (Durango) o la Estación Científica Las Joyas (Jalisco), vinculadas a reservas de la biosfera, ha producido importantes contribuciones al conocimiento ecológico de ecosistemas de selvas tropicales húmedas y secas, matorrales semiáridos y bosques subtropicales de montaña (véase capítulo 5).

En todos estos casos el éxito ha sido posible gracias a la existencia de sitios de estudio protegidos y mantenidos con respaldo institucional, a la permanencia de grupos de científicos de universidades y centros de investigación, y a la colaboración y el intercambio académico, que han permitido la integración de distintos estudios específicos en un marco más amplio y el desarrollo de bases de datos y sistemas de información que sirven como punto de partida y contexto para nuevos estudios. Estas condiciones han facilitado el desarrollo de un conocimiento cada vez más amplio, profundo e integral de los sistemas bajo estudio. Además de su contribución a la generación de conocimiento científico, estos sitios han servido para la formación, capacitación y entrenamiento de científicos y técnicos.

La investigación ecológica de largo plazo implica varios retos, tales como: 1. El establecimiento de sitios de estudio en sistemas naturales, manejados o transformados, que deben mantenerse a través del tiempo bajo algún esquema de protección, 2. El mantenimiento y desarrollo de la infraestructura y equipamiento

necesarios para llevar a cabo la investigación, 3. La continuidad del financiamiento y el apoyo institucional, 4. El manejo de datos e información sistematizada y su conservación a través del tiempo, 5. El establecimiento de mecanismos de cooperación entre científicos de distintas instituciones y 6. La puesta en práctica de formas de comunicación de los resultados, dirigidas no sólo a la comunidad científica, sino de manera especial a los responsables de la gestión ambiental, los manejadores de recursos naturales y la sociedad en general (Rivera-Monroy *et al.*, 2004; Vaughan, 2005; Vose, 2005).

2.2. Aplicaciones de la investigación ecológica a largo plazo

Además de las limitaciones de las investigaciones de corto plazo para la generación de conocimiento y el desarrollo de la teoría ecológica, en las últimas tres décadas han aumentado rápidamente las demandas de información, estudios y evaluaciones dirigidas a sustentar sobre principios, criterios e indicadores ecológicos la toma de decisiones para atender una gran variedad de problemas relacionados con la gestión ambiental, el manejo de recursos naturales y la conservación de la naturaleza (O'Neill, 1989; Lubchenco *et al.*, 1991). En el caso de México, como en otros países, la aplicación de la legislación ambiental y de recursos naturales, así como de las normas oficiales e instrumentos de gestión —tales como planes de manejo de recursos naturales, ordenamientos territoriales, ordenamientos pesqueros, evaluaciones de impacto ambiental, protección de espacios silvestres, control de la contaminación, restauración o rehabilitación de áreas degradadas, aplicación de incentivos a la conservación de ecosistemas por la generación de servicios ambientales, etc.— demandan de manera creciente las aportaciones del conocimiento ecológico. Los requerimientos de respuestas de la ecología a la gestión ambiental abarcan cuestiones relativas a diferentes escalas, desde la evaluación del impacto de una obra o proyecto en los ecosistemas que rodean a una localidad, hasta el entendimiento de los efectos continentales o globales de la precipitación ácida, el ciclo del car-

bono o el cambio climático. La yuxtaposición de nuevos problemas de estudio, y el desarrollo de nuevas técnicas de investigación, han llevado a los ecólogos a considerar la necesidad de estudiar los problemas de escala y jerarquía (O'Neill, 1989; Allen & Hoekstra, 1992). Esto ha conducido a reafirmar la necesidad de desarrollar estrategias de investigación ecológica de largo plazo.

La mayoría de los problemas ambientales más apremiantes cuya atención requiere el aporte de conocimiento ecológico, tales como el cambio climático global, los efectos de la deforestación o de la eutrofización, entre otros, corresponden a fenómenos que se manifiestan a través de largos periodos de tiempo a escalas regionales o globales (Schneider, 2002). Por tal motivo, los estudios a largo plazo pueden contribuir sustancialmente al entendimiento y solución de los problemas ecológicos, tanto teóricos como prácticos (Strayer *et al.*, 1986; Likens, 1998; Gosz, 1999).

En el planteamiento de la misión de la Red Internacional de Investigación Ecológica a Largo Plazo (ILTER), como en el caso de las redes nacionales que la integran, se establece claramente el propósito de proveer información y conocimiento relevantes para contribuir a resolver problemas medioambientales (Parr, 2010). La utilidad de los estudios ecológicos de largo plazo ha sido demostrada en muchos casos, que incluyen desde la aportación de datos de monitoreo de variables ambientales que sirven para la planificación, toma de decisiones y evaluación de la gestión ambiental hasta el desarrollo de principios teóricos y propuestas prácticas para el manejo de ecosistemas. Pueden citarse varios ejemplos de sitios de investigación como Hubbard Brook, Coweeta y el bosque experimental Andrews en Estados Unidos o Luquillo en Puerto Rico (que forman parte de la red norteamericana, que es la que tiene más tiempo en operación y cuenta con mayores recursos) han incidido en el desarrollo de nuevos enfoques y prácticas de manejo de bosques y cuencas (Lugo, 1986; Sharitz *et al.*, 1992; Swanson & Franklin, 1992; Golley, 1993). Otros ejemplos incluyen las contribuciones de los estudios de largo plazo a cuestiones como el manejo del agua y la restauración de humedales, la evaluación de la capacidad de los bosques

para capturar y almacenar carbono, la conservación y el manejo de pesquerías, la remediación del impacto de la minería, el papel de la diversidad de insectos en el control de plagas agrícolas o la gestión ambiental en zonas urbanas.³ En el plano internacional las redes integrantes de ILTER han abordado temas como la mitigación y adaptación al cambio climático, el uso sustentable de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos o el impacto de desastres originados por fenómenos naturales, y sus áreas de estudio sirven como sitios demostrativos y de transferencia de tecnología (Parr, 2010).⁴

Aunque en los últimos años se están logrando cambios al respecto, los estudios a largo plazo de procesos ecológicos habían recibido poca atención, a pesar de que muchos fenómenos ambientales de interés fundamental, como los cambios globales en la temperatura, los efectos de la lluvia ácida o los problemas de eutrofización de cuerpos de agua fueron documentados gracias al monitoreo de variables claves por periodos de tiempo extensos.

Los sistemas naturales presentan a menudo desfases a largo plazo entre causa y efecto. Los “grandes efectos provocados por pequeñas causas” (Ricker, 1963), son producto del acoplamiento de procesos que ocurren a diferentes tasas (Carpenter & Turner, 2001). Por ejemplo, la expansión explosiva y el impacto de las especies invasoras pueden manifestarse décadas después de su introducción original (Vitousek *et al.*, 1996; Cowx, 1997). En el caso de proyectos de restauración, el éxito o fracaso de las intervenciones de manejo sólo pueden ser evaluadas después de varios años (Ruiz-Jaén & Aide, 2005). La distinción entre eventos aislados y patrones cíclicos o tendencias direccionales, así como la detección de la existencia de estabilidad o falta de ella en un ecosistema, sólo pueden ser evaluadas a través de observaciones realizadas en intervalos de tiempo largos (Magnuson, 1993; Gosz, 1999). Las perturbaciones infrecuentes a

gran escala tienen implicaciones ecológicas críticas en el comportamiento de los ecosistemas (Turner & Dale, 1998), que son diferentes de aquellas derivadas de las perturbaciones menores frecuentes (Romme *et al.*, 1998); su análisis sólo es posible con estudios a largo plazo que facilitan la descripción de la variabilidad natural intrínseca y que ayudan a establecer las condiciones básicas de los sistemas ecológicos. Esto es fundamental para aumentar nuestra capacidad de discernir entre las respuestas a las perturbaciones de origen humano y aquellas que resultan de causas naturales. Tal entendimiento es crucial en aquellos sistemas donde eventos aislados pueden tener efectos profundos y prolongados en la estructura y función de un ecosistema.

2.3. Los orígenes de la investigación ecológica a largo plazo

La investigación ecológica de largo plazo tiene viejos antecedentes, a pesar de que su consolidación alrededor del mundo es reciente. Algunos estudios clásicos en ecología se basaron en el análisis de datos de largas series de tiempo; un ejemplo bien conocido, citado frecuentemente en los libros de texto de ecología, es el análisis de las fluctuaciones de las poblaciones de lince y liebres basado en los registros acumulados en Canadá por la Compañía de la Bahía de Hudson entre los años 1850 y 1930, que contribuyeron al desarrollo de la teoría sobre las interacciones depredador-presa (Blasius *et al.*, 1999). Los datos de captura han servido para estudiar a largo plazo la dinámica de poblaciones de peces y ballenas con fines aplicados a la regulación de las pesquerías y la conservación de especies amenazadas (Watt, 1968). Otro ejemplo histórico es el de los estudios limnológicos de Birge en los lagos de Wisconsin, que contribuyeron al desarrollo de la ecología de ecosistemas (Golley, 1993). Los registros continuos de variables meteorológicas, parámetros fisicoquímicos en el océano y calidad del aire, han sido fundamentales no sólo como contexto de los estudios ecológicos, sino también para establecer evidencias sobre fenómenos como el cambio climático global (Smil, 1997; IPCC, 2007) o la Oscilación Sureña-

3. Éstos y otros ejemplos de estudios ecológicos de largo plazo y su aplicación, en el caso de Estados Unidos, pueden consultarse en: www.ilternet.edu.

4. La información general sobre ILTER puede consultarse en: www.ilternet.edu.

El Niño (Larkin & Harrison, 2002). En el campo de la investigación forestal, el establecimiento de sitios permanentes de monitoreo ha sido una herramienta básica para estudiar la productividad de los bosques, entender la dinámica de rodales (Koop, 1990) y el papel de la vegetación en la dinámica hidrológica de las cuencas (Douglas & Swank, 1975). Varios de los sitios de investigación ecológica de largo plazo existentes actualmente en los Estados Unidos (como las estaciones de Hubbard Brook, Coweetta y Andrews), fueron establecidos entre las décadas de 1930 y 1940 por el servicio forestal de ese país con el propósito de generar conocimiento aplicado al manejo de bosques y cuencas. Los datos generados en dichas estaciones sirvieron de base para el desarrollo de estudios sobre los ciclos del agua y nutrientes en ecosistemas forestales (Douglas & Swank, 1975; Bormann & Likens, 1979; Golley, 1993). En otros países los sitios y las redes de investigación ecológica a largo plazo se han establecido apoyando tanto la investigación como el desarrollo de sistemas de monitoreo que aportan información para las agencias gubernamentales encargadas de la gestión ambiental.

Entre los antecedentes importantes para el desarrollo de redes de investigación ecológica de largo plazo en el mundo, se encuentran el Programa Biológico Internacional (IBP, *International Biological Program*) y el Programa del Hombre y la Biosfera (MAB, *Man and Biosphere Program*) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). El IBP se desarrolló entre 1964 y 1974 promovido por el Consejo Internacional de Uniones Científicas (ICSU) y la Unión Internacional de Ciencias Biológicas (IUBS), siguiendo el modelo de cooperación científica que había sido exitoso con el Año Geofísico Internacional de 1957-1958. El IBP fue un programa de investigación enfocado en las áreas de conservación de comunidades terrestres, adaptabilidad humana al cambio ambiental, productividad de ecosistemas y recursos bióticos en ambientes terrestres, marinos y de agua dulce, sistemática y biogeografía, y uso y manejo de recursos bióticos. Los conceptos de redes de colaboración científica, estudios de largo plazo y establecimiento de estaciones o sitios de investigación formaron parte del enfoque del

IBP, que sin duda tuvo un papel importante en la gestación de las redes actuales de investigación ecológica de largo plazo en países como Estados Unidos (Golley, 1993).

El programa de Investigación Ecológica a Largo Plazo (LTER, por sus iniciales en inglés) en los Estados Unidos, fue establecido específicamente para apoyar y financiar este tipo de investigación (Gosz, 1999). La investigación a largo plazo y la colaboración facilitada por la estructura de una red han desempeñado en ese país un papel importante en diversos temas de investigación ecológica, tales como la evaluación de la relación entre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Symstad *et al.*, 2003) o el estudio experimental de los ciclos del agua y nutrientes (Bormann & Likens, 1979; Golley, 1993). El éxito de este programa, y la falta de estudios funcionales similares a través de una diversidad de zonas ecológicas, estimuló el establecimiento de redes de investigación ecológica de largo plazo en distintos países del mundo (figura 3) y de su agrupación en la Red Internacional ILTER (Gosz, 1996) que para agosto de 2009 tenía como miembros a las redes de 41 países (Parr, 2010; véase también: www.ILTERnet.edu).

El Programa MAB se desarrolló a partir de la experiencia del IBP; fue concebido en 1968 en la Conferencia Internacional de la Biosfera organizada por la UNESCO, y se inició formalmente en 1974 para impulsar un programa de investigación interdisciplinario e internacional sobre las relaciones entre las sociedades humanas y su ambiente, incorporando el componente social y otros elementos de las ciencias naturales, además de la biología (UNESCO, 1989). El enfoque de MAB era “desarrollar, entre las ciencias naturales y sociales, una base para el uso racional y la conservación de los recursos de la biosfera para el mejoramiento de la relación entre el hombre y su ambiente, predecir las consecuencias de las acciones de ahora en el mundo del mañana y, en consecuencia, incrementar la capacidad del hombre de manejar eficientemente los recursos naturales de la biosfera” (UNESCO, 1972). Los proyectos generales de MAB abordaron diferentes temas de estudio en ecosistemas áridos y semiáridos, ecosistemas tropicales, montañas, islas y ecosistemas costeros, ecotonos e interfase terrestre-acuática

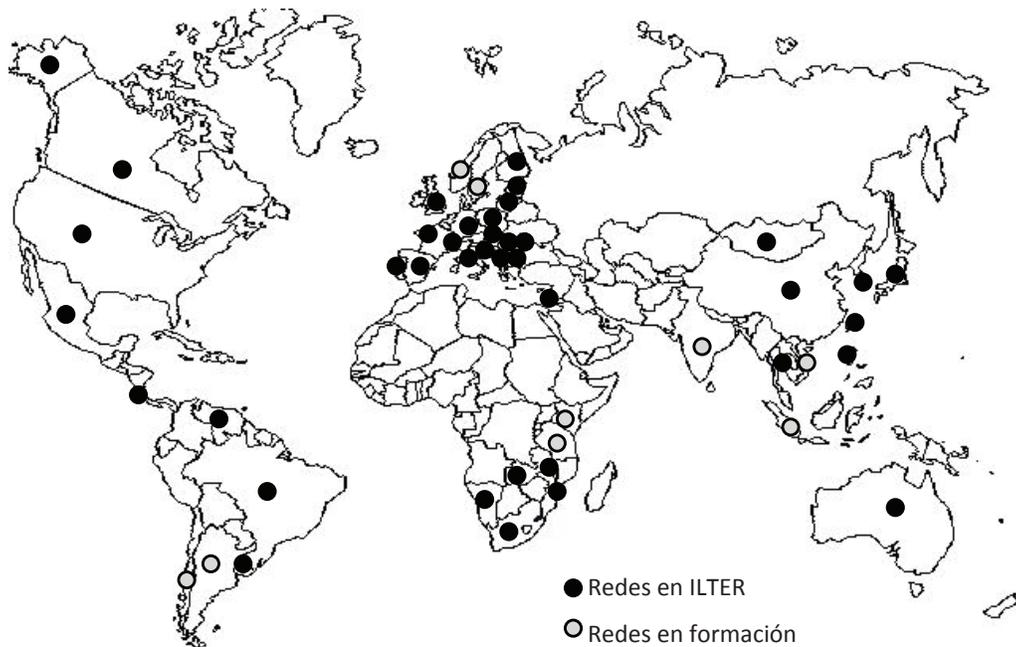


Figura 3. La Red Internacional de Investigación Ecológica de Largo Plazo (ILTER) está formada por redes nacionales activas en Alemania, Australia, Austria, Brasil, Bulgaria, Canadá, China, Corea del Sur, Costa Rica, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estados Unidos, Francia, Filipinas, Finlandia, Hungría, Italia, Israel, Japón, Latvia, Lituania, Malawi, México, Mongolia, Mozambique, Namibia, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumania, Serbia, Sudáfrica, Suiza, Tailandia, Taiwán, Uruguay, Venezuela y Zambia. En otros países las redes nacionales están en proceso de formación e incorporación a ILTER. Fuente: www.ILTERnet.edu.

y sistemas urbanos. El “Proyecto 8”, denominado “Conservación de las regiones naturales y el material genético que contienen” se centró en la creación de una red internacional de áreas protegidas, que fueron denominadas como *reservas de la biosfera* (Batisse, 1986).

Además de incluir ejemplos representativos de los ecosistemas del mundo, tanto naturales como transformados, contribuyendo a su conservación, el concepto de reserva de la biosfera incorporó otras dos funciones-objetivo: integrar la conservación y la gestión ambiental con el desarrollo, y crear una red internacional para la investigación y el monitoreo. Las primeras reservas de la biosfera fueron incorporadas a la red internacional en 1976; para el año 2001, la red estaba conformada por 393 reservas en 94 países (UNESCO, 2003). Además de constituir un experimento a gran escala sobre las posibilidades de integrar la conservación con el desarrollo, las reservas de la biosfera han sido lugares donde se han generado importantes contribuciones científicas

a la ecología. Actualmente, muchos de los sitios de la Red Internacional de Investigación Ecológica de Largo Plazo se encuentran ubicados en reservas de la biosfera. Tal es el caso de México, uno de los países pioneros en el establecimiento de este tipo de reservas (Halffter, 1981, 1988).

Una ventaja del trabajo en los sitios dedicados a estudios ecológicos de largo plazo es que, al concentrarse por periodos prolongados en un mismo ecosistema o región, se facilita un entendimiento mejor y más detallado de su estructura y funcionamiento. El monitoreo continuo produce una base de información que es útil para evaluar un amplio espectro de temas ambientales (Jeffries & Foster, 2001) y sirve de contexto para nuevos estudios. Otro beneficio de esta estrategia de trabajo es la creación de un ambiente altamente atractivo para los investigadores de varias disciplinas. La comunicación y el intercambio de datos entre los investigadores generan efectos sinérgicos, ampliando la capacidad de análisis de los temas de investigación, además de maximizar

la efectividad de los casi siempre limitados recursos humanos y económicos. Adicionalmente, el trabajo en redes permite la comparación de datos y resultados entre distintos lugares y ecosistemas. Ejemplo de estas ventajas y sus resultados son los casos de varios de los sitios de investigación ecológica de largo plazo referidos anteriormente en este documento (véase una amplia discusión al respecto en Golley, 1993).

En el caso de México se cuenta con casos exitosos que muestran los efectos sinérgicos del trabajo de grupos de investigadores colaborando en el estudio de lugares específicos, como la Estación de Biología Chamela de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Noguera *et al.*, 2002) y la Estación Científica Las Joyas de la Universidad de Guadalajara (Santana *et al.*, 2004), en el estado de Jalisco. Además de desarrollarse en estas estaciones varios proyectos de investigación que han generado numerosas publicaciones científicas, se ha logrado formar a cientos de estudiantes a través de la elaboración de tesis de grado y postgrado, su participación como colaboradores en actividades de investigación y su asistencia a cursos de campo y otras actividades de capacitación y entrenamiento.

Este tipo de trabajo cooperativo en un área determinada ha generado contribuciones importantes al entendimiento de la estructura y dinámica de ecosistemas de México. Como ejemplo se pueden citar los trabajos sobre regeneración de selvas tropicales húmedas (Gómez-Pompa *et al.*, 1976; Gómez-Pompa & Del Amo, 1985) y ecología del suelo (Álvarez-Sánchez & Naranjo-García, 2003) en la Estación de Biología de Los Tuxtlas, Veracruz. En Chamela se han generado importantes resultados sobre la historia natural, la ecología y los servicios ecosistémicos generados por las selvas secas (Noguera *et al.*, 2002; Maass *et al.*, 2005). Los estudios realizados en el Laboratorio del Desierto de la Reserva de la Biosfera de Mapimí han contribuido al entendimiento de la ecología de ecosistemas semiáridos (Halffter, 1981; Montaña, 1988). En la Estación Científica Las Joyas de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán se han desarrollado investigaciones aplicadas a la conservación de biodiversidad y el manejo de bosques de pino-encino y mesófilo de montaña (Cuevas & Jardel, 2004).

Estos ejemplos⁵ ponen de manifiesto las posibilidades del enfoque de investigación ecológica de largo plazo en México y su potencial para contribuir no sólo al avance del conocimiento científico, sino también al entendimiento de cuestiones aplicadas a la gestión ambiental, la conservación de la naturaleza y el manejo de los recursos naturales.

2.4. Relevancia para México

Con el propósito de poner en práctica la investigación ecológica de largo plazo y enfrentar exitosamente los retos que esto implica, se ha constituido la Red Internacional (ILTER, *International Long Term Ecological Research Network*), la cual está formada actualmente por el conjunto de redes nacionales de 40 países alrededor del mundo (figura 3; véase www.ilternet.edu). Una de estas redes nacionales es la Red Mexicana (Red MEX-ILTER), la cual se constituyó en el año de 2004 a partir de una iniciativa planteada por un grupo de investigadores de distintas instituciones científicas nacionales, y está conformada actualmente por 11 grupos de investigación con alrededor de 150 investigadores, más 8 integrantes en la categoría de individuos y 78 investigadores afiliados en la categoría interesados en incorporarse en el futuro como miembros individuales o como parte de un grupo. Estos investigadores pertenecen a unos 30 centros o institutos de investigación y universidades nacionales y extranjeras, y trabajan en distintos ambientes terrestres y acuáticos. El propósito de la red es fomentar un enfoque de investigación que permita abordar, de manera interdisciplinaria, el estudio de patrones y procesos ecológicos a escalas temporales y espaciales amplias, contribuyendo a la generación de conocimiento sobre los ecosistemas de México y aportando elementos para su aprovechamiento sustentable, conservación y restauración o rehabilitación.

La participación de México en el esfuerzo internacional de la investigación ecológica de largo plazo, es crucial por las siguientes razones:

5. Estos ejemplos se amplían en el capítulo 5 donde se describen las actividades de los grupos que integran la Red MEX-ILTER.

- a) México es considerado como uno de los países con mayor diversidad biológica (tanto de especies como de ecosistemas) del mundo (Ramamoorthy *et al.*, 1998; Mittermeier *et al.*, 1997; Sarukhán *et al.*, 2009), debido a su complejidad fisiográfica —amplitud altitudinal, variedad de climas, sustrato geológico y suelos (Challenger, 1998; Challenger & Soberón, 2009)— y a su localización en una zona de transición biogeográfica entre los reinos Holártico y Neotropical (Rzedowski, 1978; Halffter, 1987), lo que además le confiere características únicas. De igual forma, la amplia extensión de sus costas y mar territorial hacen de México un país con una amplia diversidad de recursos marinos y costeros (Lomelí *et al.*, 1999; Yañez-Arancibia *et al.*, 1999; Rivera-Arriaga y Villalobos, 2001; Contreras-Espinosa y Warner, 2004; Yañez-Arancibia y Day, 2004; Bezaury-Creel, 2005; Lara *et al.*, 2009a, 2009b). El país presenta también una gran diversidad cultural que se refleja en la diversidad de agrosistemas y cultivos (Toledo *et al.*, 2003; Boege, 2009; Perales & Aguirre, 2009), y en la riqueza del conocimiento tradicional sobre el manejo de los recursos naturales (Jardel & Benz, 1997; De Ávila, 2009). Dado que la diversidad biológica de México representa una proporción importante de la biota mundial, es imperativo que se estudien y protejan estos recursos naturales de importancia fundamental para el desarrollo económico, social y cultural del país.
- b) México enfrenta procesos críticos de transformación del paisaje, deterioro ambiental y agotamiento de recursos naturales (Challenger & Dirzo, 2009; Sánchez-Colón *et al.*, 2009). Estos están determinados por la combinación de factores como el acelerado cambio cultural, transformaciones sociales y económicas, pobreza rural y urbana extendidas, creciente desigualdad, elevado crecimiento poblacional, patrones de consumo insustentables en los sectores de mayor ingreso económico, políticas de desarrollo económico inadecuadas, y una política ambiental y de recursos naturales históricamente errática y aún en la actualidad débil

en relación con otros sectores gubernamentales y frente a los intereses de grupos de poder económico (Tudela, 1990; Carabias *et al.*, 1994; Challenger, 1998; Calva, 2000). El conocimiento científico del impacto humano sobre los ecosistemas es indispensable para desarrollar prácticas efectivas de gestión ambiental, conservación de la naturaleza, aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y restauración o rehabilitación de áreas degradadas y recursos disminuidos.

- c) Por su ubicación geográfica y sus características naturales, tales como su ubicación latitudinal, la extensión de su línea de costa y la influencia marítima en el clima, y el relieve montañoso y la aridez en la mayor parte del país, México está afectado por procesos ecológicos y climáticos que operan a escalas continentales —por ejemplo la Oscilación Sureña-El Niño y su contraparte La Niña— y se considera que su territorio es altamente sensible a los efectos del cambio climático global (Villers-Ruíz y Trejo-Vázquez, 1998; Velarde *et al.*, 2003; Martínez y Fernández, 2004; Manson *et al.*, 2009). Estos procesos sólo pueden ser analizados adecuadamente a través de estudios de largo plazo y estrategias de investigación cooperativa a gran escala.
- d) México cuenta con una comunidad científica relativamente bien desarrollada y varios centros de investigación y enseñanza en el campo de la ecología, y dispone de varios sitios con un historial de varios años de investigación continua. Muchos de estos sitios son estaciones de campo de universidades o institutos de investigación y se encuentran vinculados a áreas naturales protegidas, principalmente reservas de la biosfera. Varios de los grupos de investigación mantienen relaciones de colaboración e intercambio académico entre sí y con instituciones de investigación de otros países de Norteamérica, Sudamérica y Europa, algunos de los cuales cuentan con redes bien establecidas de estudios a largo plazo. Esto significa una importante oportunidad para la cooperación y un excelente potencial para el desarrollo de las actividades científicas y la formación, capacitación y entrenamiento de recursos humanos.

La Red Mexicana de Investigación Ecológica de Largo Plazo

3.1. Origen de la Red MEX-LTER

La posibilidad de llevar a cabo programas y proyectos de investigación ecológica de largo plazo implica la existencia de ciertas condiciones indispensables:

- a) Una *base institucional*, esto es, la existencia de grupos organizados de investigadores respaldados por instituciones de investigación y enseñanza consolidadas, abiertas a la colaboración y al intercambio académico, que permitan desarrollar y mantener la continuidad de los trabajos científicos a través del tiempo.
- b) El establecimiento de *sitios de investigación de campo*, protegidos, en los que exista vinculación con unidades de conservación (como reservas de la biosfera, estaciones o reservas científicas, parques nacionales y otras áreas protegidas) o con comunidades u organizaciones locales, y que cuenten con infraestructura (por ejemplo alojamiento, estaciones meteorológicas, laboratorios, equipamiento, sistemas para el almacenamiento y procesamiento de información, y otras facilidades) que permitan mantener a través del tiempo las condiciones de trabajo que se requieren para llevar a cabo proyectos de largo plazo.
- c) El desarrollo de *mecanismos de financiamiento* que permitan generar y mantener los recursos humanos y materiales necesarios para llevar a cabo la investigación a largo plazo.
- d) Una *organización en red* que permita la colaboración, la cooperación, la concertación de acciones, la comunicación y el intercambio de información entre grupos y sitios de investigación.

La creación de la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER) tiene el propósito de servir como esa organización que facilite el trabajo entre grupos de investigación que comparten un enfoque común en torno a la investigación ecológica. La creación de la Red MEX-LTER es el resultado de varios años de trabajo, a través de los cuales se fueron desarrollando instituciones dedicadas a la ecología y se formaron grupos de científicos que centraron sus esfuerzos en sitios o regiones de estudio, en varios casos estableciendo estaciones de campo y vinculándose con proyectos de gestión de áreas naturales protegidas. La historia de este proceso de desarrollo de la investigación ecológica en México, que se ha dado muchas veces en condiciones difíciles y adversas, merece un análisis que rebasa el propósito de este documento, por lo que a continuación sólo se presentan algunos

aspectos generales de los antecedentes directos de la Red MEX-LTER.⁶

Un antecedente importante es la creación de las primeras estaciones de campo para la investigación biológica, llevada a cabo por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). A finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, comenzó a desarrollarse el interés en el estudio de la biología y ecología de bosques tropicales húmedos, lo que llevó a investigadores como Faustino Miranda y Mario Sousa Sánchez a promover la creación de una estación de campo en la región de Los Tuxtlas, en el estado de Veracruz. Esta estación se creó formalmente en 1967, quedando desde entonces bajo la administración del Instituto de Biología de la UNAM. El propósito de crear la Estación de Biología de Los Tuxtlas fue el de contar con un sitio de estudio que, a través de la concentración de los trabajos de largo plazo de los investigadores, contribuyera al conocimiento de la diversidad biológica y los procesos ecológicos de las selvas tropicales húmedas (Lot, 1976). Estos esfuerzos pronto generaron contribuciones importantes para el entendimiento de procesos como la regeneración y la sucesión ecológica en bosques tropicales (Gómez-Pompa *et al.*, 1976; Gómez-Pompa y Del Amo, 1985). Con el mismo enfoque, en 1971 se creó otra estación de biología de la UNAM para el estudio de las selvas tropicales secas en Chamela, Jalisco (Noguera *et al.*, 2002).

A mediados de la década de 1970, se creó el Instituto de Ecología AC con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), la Secretaría de Educación Pública y el gobierno del estado de Durango y se promovió en 1975 la creación de las dos primeras reservas de la biosfera de México: Mapimí en el Desierto Chihuahuense y La Michilía en una zona de bosques de pino-encino de la Sierra Madre Occidental (Halffter, 1981, 1988). En estas reservas se construyeron instalaciones para la investigación de campo y se iniciaron estudios con la colaboración de científicos e instituciones nacionales y extranjeras en el marco de la Red de Reservas de

la Biosfera de MAB-UNESCO (Montaña, 1988). Siguiendo este enfoque de trabajo, la Universidad de Guadalajara promovió la creación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM) en los estados de Jalisco y Colima, para proteger bosques subtropicales de montaña, promover un proceso integrador de la conservación y el desarrollo rural y llevar a cabo programas de investigación y monitoreo de largo plazo y formación y capacitación a distintos niveles (Jardel, 1992). En 1984 se iniciaron los trabajos de investigación de campo que llevaron a la creación de la Estación Científica Las Joyas y al decreto de la RBSM en 1987 (Santana *et al.*, 2004).

De igual manera, en la década de los 1970 se crean estaciones de investigación marina por parte de la UNAM, para el estudio de diferentes procesos ecológicos en las zonas costeras y la plataforma continental, donde los recursos pesqueros y los humedales tienen una gran importancia económica y social. Estos son algunos ejemplos de los primeros esfuerzos para el desarrollo de sitios dedicados a la investigación ecológica de largo plazo en México.

A principios de los años ochenta, en la Estación de Biología de Chamela de la UNAM se inició lo que puede considerarse el primer proyecto planteado explícitamente con un enfoque de ecosistemas y de estudios a largo plazo en México, con la colaboración entre científicos mexicanos y norteamericanos. La Red de Investigación Ecológica a Largo Plazo de Estados Unidos de Norteamérica (US-LTER) se había constituido formalmente en 1980. Uno de los primeros contactos entre un grupo establecido de investigación ecológica a largo plazo y científicos mexicanos ocurrió en 1981, cuando José Sarukhán de la UNAM, Carl Jordan de la Universidad de Georgia y Wayne Swank del Laboratorio de Hidrología de Coweeta del Servicio Forestal de Estados Unidos, se reunieron para diseñar un estudio ecosistémico en Chamela. El esfuerzo científico conjunto entre Chamela y Coweeta ha continuado desde entonces, a través de la colaboración entre Manuel Maass por parte de la UNAM y James Vose por el Laboratorio de Coweeta. Otros esfuerzos conjuntos han surgido de relaciones entre profesores y estudiantes a través de estudios interdisciplinarios; en los años noventa se

6. Para un análisis contemporáneo sobre el desarrollo de la investigación ecológica en México, véase Martínez (2006), Toledo y Castillo (1999) y Castillo y Toledo (2000).

iniciaron investigaciones de largo plazo con la colaboración entre la Estación Zoquiapan del Colegio de Posgraduados en el Estado de México y el proyecto LTER del Bosque Experimental H. J. Andrews en Oregon, Estados Unidos; esto fue el resultado del trabajo de un grupo de estudiantes mexicanos que obtuvieron su postgrado en la Universidad Estatal de Oregon y de la continuación de las líneas de investigación iniciadas en Andrews.

Con el éxito de la Red US-LTER y con el reconocimiento de la importancia de expandir su enfoque de trabajo en otros países, se propuso una reunión para crear la Red Internacional de Investigación Ecológica a Largo Plazo, denominada ILTER por sus siglas en inglés, que se llevó a cabo en Estes Park, Colorado, en septiembre de 1993 con la representación de 18 países. El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) de México recibió una invitación por parte de la Fundación Nacional para la Ciencia (National Science Foundation, NSF) de Estados Unidos, y designó como su representante al Instituto de Ecología AC que comisionó a Carlos Montaña. Además asistieron Armando Equihua y Edith Estrada que eran los estudiantes de la Universidad Estatal de Oregon que impulsaron el trabajo en Zoquiapan. Como resultado de esta primera reunión se les propuso a todos los países participantes que impulsaran la creación de redes de investigación ecológica a largo plazo en cada país, con el fin de monitorear los fenómenos ecológicos regionales y globales, con énfasis en los problemas ambientales, tales como el calentamiento global, el cambio de uso del suelo y la pérdida de la biodiversidad. Uno de los primeros pasos para la instrumentación de ese objetivo en México fue la realización de estudios comparativos entre el programa LTER en Estados Unidos y grupos mexicanos de investigación. Estas iniciativas comenzaron en octubre de 1995 con el establecimiento de una investigación comparativa entre los grupos US-LTER de Sevilleta (Universidad de Nuevo México) y La Jornada del Muerto (Universidad Estatal de Nuevo México) y la Reserva de la Biosfera de Mapimí (Instituto de Ecología AC). Los participantes fueron James Gosz, Robert Parmenter, David Lightfoot y Laura Huenneke de la red norteamericana, y Lucina

Hernández, Jorge López Portillo y Eduardo Rivera de la contraparte mexicana.

Con la finalidad de continuar con la instrumentación del programa, la NSF y el Conacyt promovieron y apoyaron el taller denominado *US/MEXICO Workshop on International Long-term Ecology and Biodiversity Research Across North America Biomes* que se realizó en la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala con el grupo LTER de Sevilleta en Nuevo México en 1997. La reunión fue organizada por Terry Yates y Jennifer Frey de la Universidad de Nuevo México y Gerardo Ceballos y Andrés García del Instituto de Ecología de la UNAM y de la Fundación Ecológica de Cuixmala, AC, respectivamente. Este taller resaltó la necesidad de establecer una red mexicana LTER, para lo cual se promovió la formación de un comité interinstitucional que se diera a la tarea de desarrollar la propuesta.

El “Comité de Creación” de la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo quedó integrado en 1998 por Gerardo Ceballos y Manuel Maass de la UNAM como coordinadores, y Ricardo Ayala (UNAM), Miguel Equihua y Lucina Hernández (Instituto de Ecología AC), Armando Equihua (Colegio de Postgraduados) y Enrique Jardel (Universidad de Guadalajara). Después de una reunión realizada en el marco del XIV Congreso Mexicano de Botánica, contando con la participación de investigadores de distintas partes del país, en noviembre de 2001 se presentó la propuesta de la Red MEX-LTER ante el Conacyt, que en febrero de 2002 nombró al Comité de Creación como el representante oficial de México ante la ILTER. En abril del mismo año la Red MEX-LTER fue oficialmente aceptada como miembro de la Red ILTER, al ser su candidatura presentada y aprobada durante la Reunión del Comité Internacional en Ottawa, Canadá. En febrero de 2004 el Conacyt y la Conabio otorgaron un financiamiento para la puesta en marcha de la Red MEX-LTER. Se creó entonces una Comisión Dictaminadora y se abrió la convocatoria para la incorporación de grupos, miembros individuales e interesados a la red mexicana, realizándose la primera reunión nacional de la Red en el marco del XVI Congreso Mexicano de Botánica en la ciudad de Oaxaca en octubre de 2004. En esta reunión se nombró al coordinador nacional y se

integró el Comité Ejecutivo con los coordinadores de los primeros 10 grupos de investigación incorporados a la Red MEX-LTER y una representante de la categoría de miembros individuales (véase: www.mex-lter.org.mx).

3.2. La misión de la Red MEX-LTER

La Red MEX-LTER es una iniciativa destinada a fomentar la investigación ecológica a largo plazo a través de mecanismos de colaboración y cooperación entre científicos mexicanos y de otros países, en el marco de la Red ILTER y otros programas o proyectos nacionales e internacionales relacionados con los temas de ecología y medio ambiente. Partiendo del reconocimiento del papel de la investigación a largo plazo en la generación de conocimiento sobre los componentes, patrones, procesos, dinámica y funciones de los ecosistemas, y de la importancia de dicho conocimiento para la gestión ambiental, el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la conservación del patrimonio natural y los sistemas de soporte de vida de la biosfera, y la restauración o rehabilitación de ecosistemas degradados, la misión de la Red MEX-LTER es la siguiente:

- a) El establecimiento de una red de investigación que permita a los científicos mexicanos abordar, de manera interdisciplinaria, el estudio de la estructura y funcionamiento de ecosistemas terrestres y acuáticos, naturales o transformados, en escalas espaciales y temporales amplias, con el fin de contribuir al entendimiento del papel de los procesos ecológicos en la provisión de servicios a la biosfera, incluyendo los proporcionados a la sociedad mexicana en particular, y a la humanidad en general.
- b) La creación de un legado de experimentos y observaciones adecuadamente diseñados y documentados para las generaciones futuras de la sociedad.
- c) Promover la formación, capacitación y entrenamiento de futuros investigadores, dentro de un marco de investigación interdisciplinaria para abordar problemas de estudio

de relevancia ecológica, social, cultural y económica para el desarrollo del país.

3.3. Objetivos

Los objetivos de la Red MEX-LTER son:

- a) Agrupar a científicos mexicanos que realizan investigación sobre procesos físicos, biológicos o sociales determinantes en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y terrestres, y que han diseñado sus esquemas de investigación incluyendo el seguimiento, a largo plazo y a gran escala, de procesos y variables clave.
- b) Impulsar el trabajo científico, integral e interdisciplinario, a través de diferentes escalas espaciales y temporales, realizado en colaboración entre los miembros de la Red MEX-LTER y otras redes nacionales de otros países.
- c) Sumar esfuerzos tanto para gestionar la obtención de recursos económicos y el desarrollo de infraestructura, como para formar recursos humanos que permitan abordar, de manera más eficiente, la problemática ambiental nacional, regional y global.
- d) Conformar una plataforma común de investigación que haga posible tanto la comparación de resultados como la sistematización y el resguardo de los datos generados, a fin de crear un legado de experimentos y observaciones, adecuadamente diseñados y bien documentados, para las generaciones futuras.
- e) Generar y diseminar información que permita a las diversas instituciones del país un mejor diseño y desempeño de las políticas ambientales para el ordenamiento, aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos y servicios que ofrecen los ecosistemas acuáticos y terrestres.
- f) Impulsar una participación más activa y coordinada de México en la agenda científica internacional en temas ambientales.⁷

7. México participa en varios programas internacionales relacionados con la agenda ambiental y la investigación ecológica como la misma Red ILTER, el Programa Internacional de la

3.4. Estructura y operación

La Red MEX-LTER se ha constituido en un importante mecanismo de colaboración entre instituciones e investigadores para el desarrollo de la ecología en México, con un excelente potencial. Una característica fundamental de esta red es su enfoque de la investigación ecológica por periodos extensos y en áreas grandes, de una forma que generalmente no se ha realizado antes en México de una manera organizada a escala nacional. Una de las innovaciones del enfoque de la red es la posibilidad de diseñar y poner en marcha proyectos similares en distintos sitios del país y compartir datos estandarizados entre los grupos que participan en ella.

El programa mexicano de investigación ecológica de largo plazo pretende incluir grupos que estén trabajando en todo tipo de ecosistemas terrestres y acuáticos, tanto naturales como transformados o bajo manejo. A nivel nacional, debe permitir las comparaciones entre y dentro de diferentes biomas, eco-regiones y tipos de ecosistemas. A nivel internacional, deberá hacer posible la comparación entre y dentro de los biomas a diferentes escalas geográficas. Por lo tanto, en los sitios de estudios de la red se deberá tener la representación de los principales biomas y eco-regiones del país, con réplicas dentro de cada uno. En su conformación actual (enero de 2010) la Red MEX-LTER incluye a 11 grupos de investigación (cuyo trabajo se describe en el capítulo 5) que trabajan en ambientes marinos y costeros, lagos, ríos, selvas tropicales, bosques de montaña y zonas áridas, considerando tanto ecosistemas naturales como transformados o manejados (cuadro 1, figura 4).

Algunos de los grupos de investigación de la Red MEX-LTER tienen antecedentes de varios años de trabajo, mientras que otros se han conformado o reorganizado expresamente para participar en esta iniciativa. Algunos grupos realizan su investigación en estaciones biológicas y áreas protegidas, que en cierta medida garantizan la continuidad a largo plazo de los proyec-

tos, ajustándose a la normatividad de las instituciones que coordinan el manejo en cada sitio. A los grupos de trabajo se les ha identificado con el nombre del sitio, región o tipo de ecosistemas donde realizan su investigación, lo que no implica que todos los grupos de investigación que estén trabajando en un sitio formen necesariamente parte de esta iniciativa.

Los grupos de investigación en cada sitio centran sus actividades alrededor de dos tareas fundamentales: 1. La realización de investigación en áreas temáticas fundamentales (véase sección 4.3), y 2. El seguimiento a largo plazo de observaciones o registros de variables ecológicas y ambientales clave (véase sección 4.4).

Para asegurar el éxito del desarrollo e instrumentación de los objetivos de investigación de la red, debe seguirse un marco conceptual común, así como asumir normas y procedimientos estandarizados en cuanto a la calidad de los datos, los sistemas de información y los métodos de estudio. El enfoque de trabajo en red ha sido adoptado para facilitar la cooperación interinstitucional, la colaboración entre investigadores, la comunicación, el intercambio de información y el diseño de proyectos conjuntos y estudios comparativos entre los sitios y temas de trabajo.

Una cuestión fundamental en la investigación ecológica a largo plazo es el desarrollo de bases de datos y sistemas de información que puedan ser compartidos entre los grupos de investigación y la generación de productos que puedan servir a distintos usuarios, no sólo a investigadores y estudiantes sino también a dependencias gubernamentales y organizaciones civiles, al igual que a grupos sociales relacionados con la gestión ambiental y el manejo de los recursos naturales. Esto implica el desarrollo de bases de datos y sistemas de información bien organizados y estandarizados, y el establecimiento de políticas de uso y manejo de la información, que incluyen aspectos tales como derechos de autoría, propiedad, liberación y acceso a los datos. Estos aspectos deben ser definidos y formalmente acordados entre los miembros de la red.

En una primera etapa, los participantes en la Red MEX-LTER nos hemos obligado a hacer disponible la información relativa a los metadatos de nuestros estudios de largo plazo. Estos me-

Geosfera-Biosfera (IGBP), DIVERSITAS, el Comité Científico sobre Problemas Ambientales (SCOPE) y el Programa del Hombre y la Biosfera (MAB-UNESCO), entre otros.

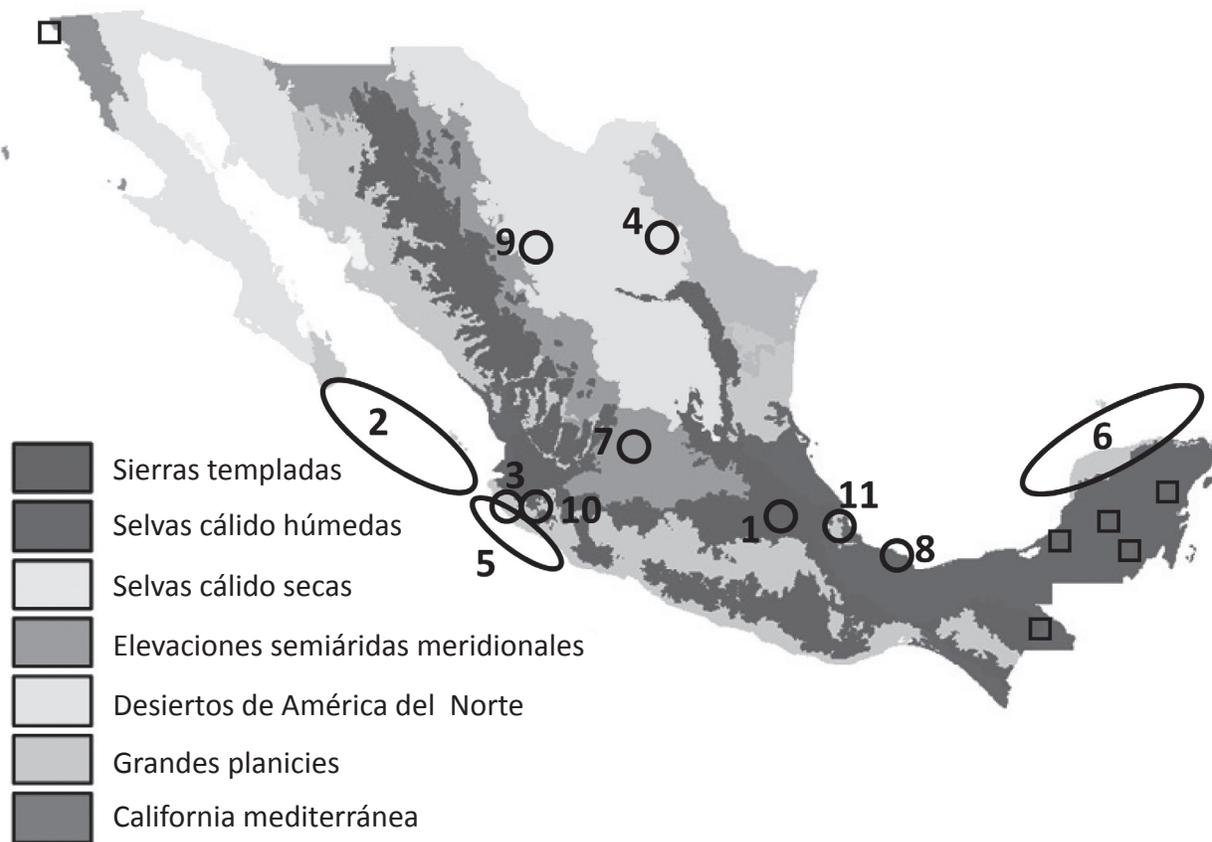


Figura 4. Localización de los sitios de estudio de grupos (círculos y óvalos grandes) y los miembros individuales (cuadros) integrantes de la Red MEX-LTER. 1. Alchichica, 2. Arrecifes del Pacífico, 3. Chamela, 4. Ecosistemas del Altiplano, 5. Ecosistemas Costeros de Jalisco y Colima, 6. Ecosistemas Costeros de la Península de Yucatán, 7. Gracilis, 8. Los Tuxtlas, 9. Mapimí, 10. Sierra de Manantlán, 11. La Mancha. Varios de los grupos tienen áreas de estudio más extensas que el punto que aparece en el mapa, ya que trabajan en distintos lugares dentro de un tipo de ecosistema, como es el caso de los grupos de ecosistemas costeros (2, 5, 6) o de pastizales (7). El mapa muestra las ecorregiones terrestres de México. Fuente: Conabio.

tadatos consisten en archivos diseñados con un formato común, en los que se incluye información sobre los temas y métodos de investigación, la localización y características de los sitios de estudio, las variables que se registran y el tipo de datos que se han generado, desde cuándo y con qué periodicidad se han registrado las variables, cuáles han sido los métodos utilizados, qué publicaciones o informes se han generado y si los datos pueden estar disponibles para otros investigadores o usuarios y, en este caso, cuáles son las condiciones de uso y acceso. Se busca con esto hacer disponible información que permita a los grupos e investigadores conocer qué es lo

que hacen sus colegas y cómo lo hacen, y que eventualmente puedan establecer acuerdos para compartir o comparar resultados, diseñar nuevos proyectos o incluso aprovechar la experiencia de un grupo sobre métodos o técnicas relativos a una de las áreas temáticas o las líneas de monitoreo para desarrollar éstas en otro grupo. Se busca también generar una cultura que promueva la colaboración y la liberación de información, y crear condiciones que permitan lograr avances más consistentes en la investigación haciendo un buen uso de la información. En esto partimos de la experiencia de otras redes de investigación ecológica de largo plazo, en las cua-

les la disponibilidad de información compartida ha tenido buenos resultados para el avance de la investigación y la productividad académica de grupos e investigadores. Compartir los datos generados a través de la investigación y el monitoreo será una tarea clave para el éxito de la Red.

Con el desarrollo de la Red MEX-LTER se espera también emprender en los sitios de estudio proyectos de monitoreo con equipos y métodos estandarizados que permitan generar información de uso común, como puede ser por ejemplo los datos de monitoreo meteorológico e hidrológico.

Como parte esencial del desarrollo de la red, se pretende que los grupos que la integran vayan mejorando sus capacidades, infraestructura y equipamiento para el establecimiento de sitios de estudio a diferentes escalas (parcela, cuenca, región), el manejo de bases de datos, sistemas de información geográfica, colecciones biológicas de referencia y redes de monitoreo con la aplicación de técnicas avanzadas, instrumentos y *software* adecuados, prácticas de control de calidad de los datos y métodos de modelación que permitan elaborar predicciones o simular procesos de cambio en variables clave o escenarios posibles en diversos temas de estudio.

La figura 5 presenta el organigrama de la Red MEX-LTER. La base de la red son los grupos de investigación que están integrados por investigadores que se han asociado para desarrollar estudios ecológicos en un sitio, ecosistema o región determinada. Aunque por lo general la mayor parte de los investigadores de un grupo están adscritos a una misma universidad o centro de investigación, en todos los grupos existen miembros de otras instituciones (cuadro 1).

Cada grupo cubre por lo menos cuatro de las ocho áreas temáticas de la red (véase sección 4.3) y las líneas de monitoreo (sección 4.4) por lo menos al nivel básico. Con el fin de promo-

ver una mayor participación en la Red, se creó una categoría de miembros que participan individualmente; éstos son investigadores que desarrollan alguna de las áreas temáticas y que están en proceso de integrar grupos que puedan incorporarse posteriormente.

La red realiza reuniones anuales con la participación de sus integrantes, además de talleres específicos donde se establecen los lineamientos y planes de trabajo, las plataformas comunes de investigación y los proyectos conjuntos, además de servir como un espacio de comunicación y discusión de avances y resultados. Cada grupo de investigación y el conjunto de los miembros individuales tienen dos representantes (un titular y un suplente), que conforman el Comité Ejecutivo, máximo órgano de gestión de la Red MEX-LTER. Este comité es la instancia a través de la cual se establecen las políticas y normas de trabajo, se programan las actividades y se evalúan periódicamente los resultados, a partir de los insumos aportados por cada grupo y por las reuniones nacionales y talleres.

Dos comisiones apoyan el trabajo de la Red: la Comisión Dictaminadora, integrada por investigadores de reconocido prestigio en el campo de la ecología, es la encargada de evaluar y dictaminar el ingreso de nuevos grupos o individuos, mientras que la Comisión de Usuarios es un cuerpo consultivo integrado por instituciones gubernamentales y organizaciones civiles relacionadas con la investigación científica, la gestión ambiental, la conservación y el manejo de recursos naturales. El seguimiento operativo a los trabajos de la Red se hace a través de un Coordinador Nacional (nombrado por los representantes de los grupos en el Comité Ejecutivo) que cuenta con un *staff* encargado de coordinar las cuestiones de carácter académico, administrativo, logístico y técnico.

Cuadro 1
 Grupos integrantes de la Red MEX-LTER en 2010,
 número de investigadores de cada grupo (N), instituciones a las que están adscritos,
 ecosistemas que estudian y sitios o regiones de trabajo

<i>Nombre del Grupo</i>	<i>N</i>	<i>Instituciones</i>	<i>Ecosistemas</i>	<i>Sitios o regiones de trabajo</i>
Alchichica	14	Facultad de Estudios Superiores Iztacala (UNAM), Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM), Instituto de Geología (UNAM), Departamento de Física (UdeG)	Lagos	Laguna de Alchichica, Puebla.
Arrecifes del Pacífico	7	Instituto de Investigaciones Oceanológicas (UABCS), Departamento de Ecología (CICESE), Centro Universitario de la Costa (UdeG), Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (UdeG), Instituto de Recursos Naturales (Universidad del Mar)	Arrecifes coralinos y rocosos.	Costa del Pacífico, desde Baja California Sur a Oaxaca.
Chamela	27	Centro de Investigaciones en Ecosistemas (UNAM), Instituto de Biología (UNAM); Instituto de Ecología (UNAM), Instituto de Geografía (UNAM), Instituto Nacional de Ecología, Centro de Educación Ambiental e Investigación Sierra de Huautla (UAEM), Fundación Cuixmala.	Selva baja caducifolia	Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala.
Ecosistemas del Altiplano	9	Facultad de Ciencias Forestales (UANL)	Pastizal halófilo, matorral xerófilo	Región del Altiplano, Nuevo León.
Ecosistemas Costeros	10	Departamento de Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras-Centro Universitario de la Costa Sur (UdeG); Departamento de Física (UdeG)	Estuarios, lagunas costeras y mar abierto	Costas de Jalisco y Colima.
Ecopey	18	Cinvestav Unidad Mérida, Louisiana State University, South Florida Water Management District, Florida International University	Manglares y lagunas costeras	Reserva de la Biosfera Ría Celestún, costas de Campeche y Yucatán.
Gracilis	12	Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología, Colegio de Postgraduados, Campos Experimentales Zacatecas y La Campana (INIFAP)	Pastizales semiáridos.	Meseta Central, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí.
Los Tuxtlas	13	Instituto de Biología (UNAM), Centro de Investigaciones en Ecosistemas (UNAM), Instituto de Ecología (UNAM), Facultad de Ciencias (UNAM)	Selva alta perennifolia	Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas, Veracruz
Mapimí	7	Instituto de Ecología AC	Matorral xerófilo	Reserva de la Biosfera de Mapimí, Durango
Manantlán	28	Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad-Centro Universitario de la Costa Sur (UdeG), Instituto de Ecología AC, University of Wisconsin-Madison, University of Washington.	Bosques de pino, encino y mesófilo de montaña, selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia, ríos y agroecosistemas.	Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán y cuenca del Río Ayuquila-Armería, Jalisco y Colima.
La Mancha	13	Centro de Investigaciones Costeras La Mancha, Instituto de Ecología AC	Laguna costera, manglar, dunas, selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia	La Mancha - El Llano, Veracruz

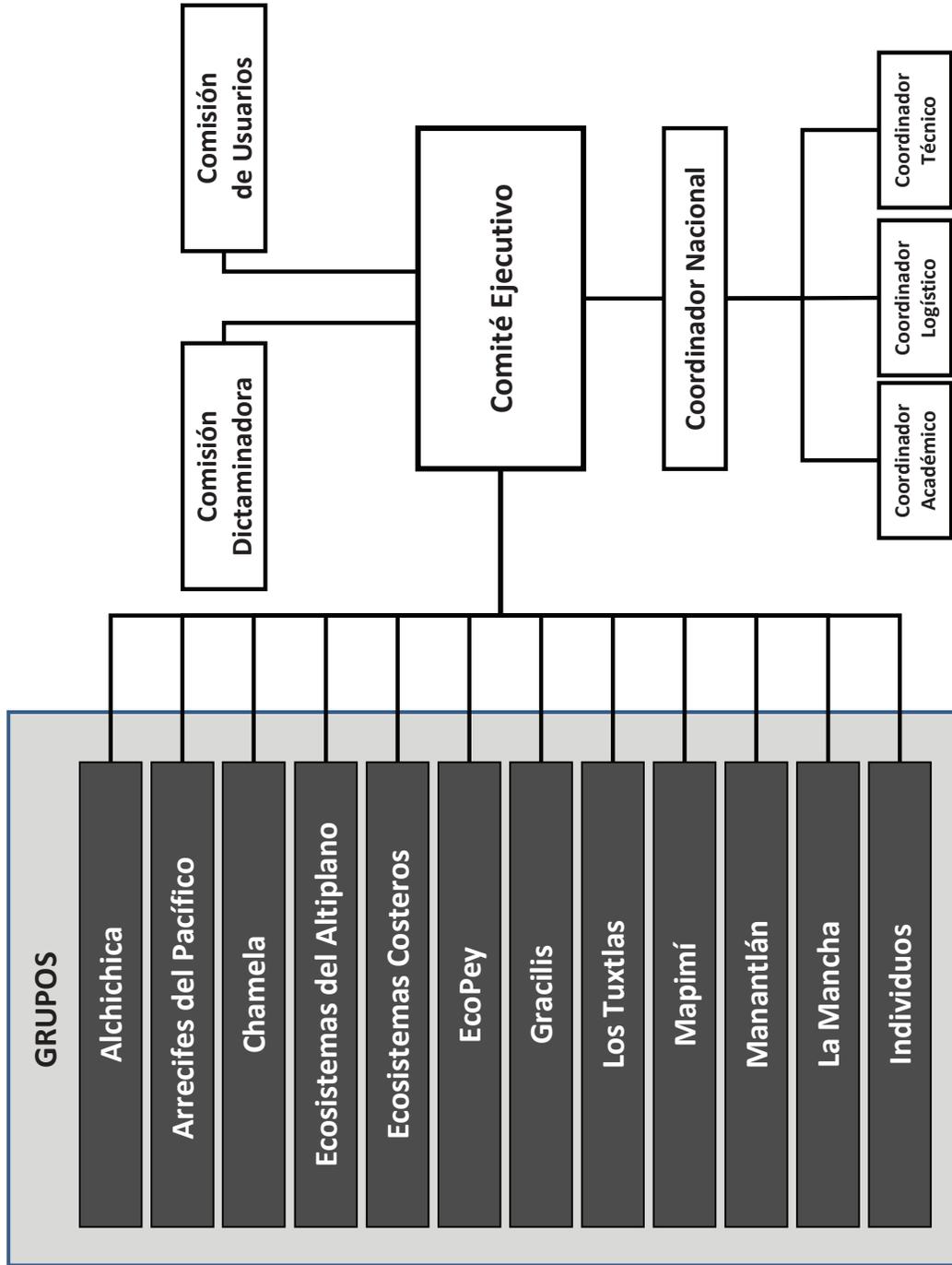


Figura 5. Organigrama de la Red Mexicana de Investigación Ecológica de Largo Plazo.

Marco conceptual

4.1. La agenda de investigación de la Red MEX-LTER

La ecología es una ciencia que tiene sus raíces en la biología, pero que integra además elementos de otros campos del conocimiento en el estudio de organismos, poblaciones y comunidades de seres vivos interactuando entre sí y con los componentes del ambiente físico, así como de las interacciones entre la sociedad y la naturaleza (Odum y Sarmiento, 1998). Los fenómenos que estudia la ecología incluyen diferentes niveles de organización, desde los organismos y las poblaciones hasta los ecosistemas y la biosfera, y también las interacciones entre los seres humanos y la naturaleza. El estudio de los procesos ecológicos tales como la dinámica de las poblaciones, los cambios en la composición y estructura de las comunidades durante la sucesión, la dinámica del paisaje, los ciclos del agua, carbono y nutrientes o los flujos de energía entre niveles tróficos, requiere de observaciones y experimentos que cubren largos periodos de tiempo y que deben ser abordados a diferentes escalas espaciales (Franklin *et al.*, 1990; Magnuson, 1990; Swanson y Sparks, 1990; Symstad *et al.*, 2003). La agenda de la investigación ecológica de largo plazo abarca una amplia gama de temas en torno al estudio de patrones y procesos ecológicos fundamentales, muchos de

los cuales se orientan a generar conocimientos indispensables para fundamentar las prácticas de la gestión ambiental y el manejo de los ecosistemas y los recursos naturales.

En el caso de la Red MEX-LTER, la agenda de investigación fue diseñada originalmente considerando siete grandes líneas de conocimiento o áreas temáticas, las cuales cubren varios aspectos fundamentales de la ecología; con el avance del proceso de integración de la red, se ha propuesto la incorporación de una o más áreas temáticas adicionales que aborden las interacciones sociedad-naturaleza desde la perspectiva socio-ecológica. Las áreas temáticas son consideradas como aquellas que abordan las características más relevantes de la composición, estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas, y muchos de los temas más apremiantes en relación con aspectos ambientales importantes para el bienestar humano. Sin embargo en el futuro podrían incorporarse otras áreas temáticas más, en función del avance del conocimiento ecológico o la necesidad de incluir nuevos temas de relevancia.

El concepto de ecosistema ocupa un lugar central en la teoría ecológica (Jørgensen, 2009) y el origen de muchos de los sitios de investigación ecológica a largo plazo alrededor del mundo está relacionado con proyectos dirigidos a la generación de conocimiento sobre los procesos que ocurren al nivel de organización en el cual, de acuerdo a la definición clásica de

Tansley (1935),⁸ todos los componentes bióticos (plantas, animales, hongos, microorganismos) y abióticos (radiación, agua, aire, minerales) están interactuando. Los procesos fundamentales que se derivan de estas interacciones dinámicas son flujos de energía, materiales e información (Odum, 1959; Likens, 1998; Jørgensen, 2009); la presencia de estos procesos permite definir como ecosistemas a diferentes unidades de estudio espacialmente explícitas a diferentes escalas, pudiendo incluir en éstas desde una charca hasta un lago, un bosque o una cuenca hidrográfica o incluso el ecosistema global, la biosfera (Chapin *et al.*, 2002; Fath, 2009).

Los ecosistemas son sistemas complejos en los que la materia y la energía fluyen y se almacenan mediante procesos —como la productividad primaria, las interacciones tróficas, la descomposición y mineralización de la materia orgánica, la intemperización de la roca, etc.— que operan a diferentes escalas espaciales y temporales (Bormann & Likens, 1979; Chapin *et al.*, 2002; Jørgensen, 2009). Son también sistemas abiertos, en los cuales la energía y los materiales fluyen a través de sus límites, conectando unos ecosistemas con otros; esto hace necesario considerar que las intervenciones humanas en un ecosistema pueden tener efectos en otros ecosistemas adyacentes (Maass *et al.*, 2005).

El concepto de ecosistema reconoce explícitamente el potencial de estudiar procesos ecológicos a escalas múltiples (Franklin, 1997; Cadenasso *et al.*, 2003). Esto implica que en cualquier investigación se debe seleccionar y definir la escala apropiada correspondiente a un objetivo o interés de estudio particular. También es necesario definir al ecosistema espacialmente, para poder medir las transferencias o flujos de energía, materiales y organismos dentro del sistema mismo y a través de sus límites, de modo que los ecólo-

gos han seleccionado para su estudio ecosistemas con límites físicos bien definidos (Franklin, 1997; Cadenasso *et al.*, 2003), como por ejemplo pequeñas cuencas (Bormann & Likens, 1979; Swank & Vose, 1997; Maass *et al.*, 2002).

El concepto de ecosistema y la investigación sobre procesos ecosistémicos han contribuido al desarrollo de nuevos enfoques y prácticas en el manejo de bosques, cuencas hidrográficas, humedales, zonas costeras y marinas, e incluso en sistemas de producción agrícola y asentamientos humanos. La investigación ecológica de largo plazo ha sido fundamental para el desarrollo del enfoque de manejo de ecosistemas (Christensen *et al.*, 1996; Franklin, 1997; Meyerson *et al.*, 2005).

Otro concepto derivado de la teoría sobre los ecosistemas, que es fundamental desde la perspectiva aplicada, es el de *servicios ambientales* o *ecosistémicos*. Este establece que los ecosistemas, a través de sus procesos fundamentales, generan las condiciones de soporte, regulación ambiental y provisión de recursos que son indispensables para la vida, además de ofrecer condiciones que contribuyen al bienestar humano y que son valoradas culturalmente (Daily, 1997; Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

La Red MEX-LTER tiene el propósito de impulsar el estudio de los procesos y funcionamiento de los altamente diversos ecosistemas mexicanos, contribuyendo no sólo a la generación de conocimiento, sino también a su aplicación en el diseño de mejores prácticas de gestión ambiental y manejo de ecosistemas y recursos naturales. Para eso se han definido una serie de temas de estudio que orientan el trabajo de la red.

Las siete áreas temáticas fundamentales que aborda la Red MEX-LTER y que fueron establecidas inicialmente son las siguientes:

- I. Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas.
- II. Patrones y control de la dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas.
- III. Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas.
- IV. Regímenes y efectos de las perturbaciones en los ecosistemas.
- V. Efecto del cambio climático en la estructura y función de los ecosistemas.

8. Para una amplia revisión de la historia y desarrollo del concepto de ecosistema véase Golley (1993) y Pickett y Cadenasso (2002). Los principios teóricos de la ecología de ecosistemas y las características fundamentales de los principales ecosistemas del mundo se revisan en la obra de Jørgensen (2009). Chapin *et al.* (2002) presentan una amplia introducción a la ecología de ecosistemas terrestres; para ecosistemas marinos y costeros véase Mann y Lazier (2005) y para ecosistemas fluviales Allan (1995).

- vi. Interacciones al nivel de interfase entre los ecosistemas naturales y manejados.
- vii. Definición de criterios para el manejo de ecosistemas.

A estas líneas de investigación, incluidas en la propuesta original de creación de la red, se pretende agregar nuevas áreas temáticas, centradas en el componente humano, abordando el estudio de las interacciones sociedad-naturaleza desde una perspectiva socioecológica, con la contribución de las ciencias sociales y las humanidades. De hecho, una tendencia actual es en varias de las redes de ILTER, existentes o en formación, es el planteamiento de un enfoque de *investigación socio-ecológica a largo plazo*, enfatizando en el componente humano de los procesos ecológicos (Haberl *et al.*, 2006; Anderson *et al.*, 2010; Rozzi *et al.*, 2010; véase sección 4.2.8).⁹

Las primeras cuatro áreas temáticas abordan el estudio de procesos ecológicos fundamentales como son los flujos de energía y los ciclos de materiales (secciones 4.2.1 y 4.2.2.), las funciones de la biodiversidad y las interacciones bióticas (sección 4.2.3), y los regímenes de perturbación que influyen en la dinámica de los ecosistemas (sección 4.2.4). Las áreas cinco y seis se centran en los cambios ambientales, con énfasis en los impactos antropogénicos y la transformación de los ecosistemas (secciones 4.2.5 y 4.2.6). El área siete es de carácter transversal y su propósito es integrar el conocimiento generado en las otras

áreas temáticas en la definición de principios y criterios para el manejo de los ecosistemas (sección 4.2.7). La que sería la octava área, incorpora los aspectos sociales —en sentido amplio, los factores culturales, institucionales y políticos, económicos y demográficos— de la ecología humana, esto es, de la interacción entre los sistemas sociales o sociosistemas, y los ecosistemas (sección 4.2.8).

La conformación de un grupo para su ingreso dentro de la Red MEX-LTER requiere que éste se encuentre abordando temas de investigación en al menos cuatro de los siete temas inicialmente planteados. El énfasis específico que se dé a cada uno será determinado por cada grupo en sus sitios de estudio. En el caso de miembros individuales, éstos estarán cubriendo por lo menos alguno de los temas.

Como ya se señaló en los antecedentes (véase capítulo 2), varios grupos de investigación de México han venido abordando algunos de los temas de investigación considerados en las líneas de trabajo definidas por la Red MEX-LTER, a veces de manera aislada en centros de investigación, estaciones de campo y sitios de estudio, o bien colaborando con otros grupos nacionales o extranjeros, o participando en redes o programas internacionales de cooperación científica. Sin embargo, hasta ahora no se había intentado integrar esos esfuerzos en un programa nacional, que a su vez formara parte de una red internacional. La Red MEX-LTER pretende desarrollar una plataforma operativa para cubrir esta necesidad. Más aún, el desarrollo de esta red nacional será un medio importante para contribuir con la continuación e instrumentación de varios convenios, programas y comités internacionales tales como el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP, por sus iniciales en inglés), el Consejo Científico para Problemas del Ambiente (SCOPE), el Programa del Hombre y la Biosfera (MAB) de UNESCO y su red internacional de reservas, y la Red Ambiental Internacional (ILTER). Adicionalmente la Red MEX-LTER proporcionará apoyo para la instrumentación de iniciativas nacionales de instituciones como la Comisión para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), el Instituto Nacional de Ecología y el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)

9. En principio puede decirse que los seres humanos, como especie biológica, forman parte de los ecosistemas. Sin embargo, el enfoque socio-ecológico enfatiza y hace explícita la importancia del componente humano, que ha sido excluido o incluso ignorado en muchos de los estudios ecológicos (MacDonell y Pickett, 1993; Foster *et al.*, 2003). También desde un punto de vista metodológico, puede ser necesario describir y analizar el componente humano como un subsistema (*sociosistema*) interactuando con los ecosistemas naturales o transformados de su entorno, como parte de un sistema mayor (*socio-ecosistema*) o bien se puede considerar a los factores antropogénicos como variables exógenas al estudiar un ecosistema o proceso en particular. De cualquier manera, hay que reconocer que la especie humana no es igual a cualquier otra especie animal, no por tratarse de nuestra propia especie sino por su dominancia en los procesos ecológicos globales en la época actual, que algunos autores definen como el *Antropoceno* (Crutzen, 2002; Steffen *et al.*, 2007; Rockström *et al.*, 2009). Estas son algunas razones que justifican un enfoque de investigación socio-ecológica.

y de diversos programas gubernamentales, de centros de investigación y enseñanza y de asociaciones civiles relacionados con la conservación de la naturaleza, la gestión ambiental, el aprovechamiento de los recursos naturales y la restauración. La Red MEX-LTER puede contribuir también al cumplimiento cabal de los convenios internacionales ratificados por México; entre otros, los convenios de Naciones Unidas sobre el cambio climático, la biodiversidad y la desertificación. Las investigaciones que se llevarán a cabo dentro de las distintas áreas temáticas contribuirán con conocimiento fundamental y bases para la formulación de políticas que permiten cumplir con los compromisos contraídos.

4.2. Descripción de las áreas temáticas

A continuación se presenta una breve reseña del marco teórico general de cada una de las siete áreas temáticas que conforman la agenda de investigación de la Red MEX-LTER. Aquí se describen a grandes rasgos la relevancia de cada área, los métodos básicos para abordar los estudios de largo plazo, algunas variables relevantes para su seguimiento y el tipo de infraestructura general que se requiere. Resulta claro que las preguntas de investigación, las hipótesis de trabajo, la infraestructura y métodos empleados, así como las variables específicas a medir, dependerán del ecosistema en particular que sea objeto de estudio. Así mismo, los enfoques y métodos de estudio actuales irán evolucionando con el avance de la investigación y con la incorporación de nuevas ideas, conceptos y técnicas; como ha ocurrido, por ejemplo, con la aplicación de modelos de simulación, métodos de percepción remota, nuevas técnicas de monitoreo ambiental y sistemas de gestión de bases de datos e información (Sala *et al.*, 2000; Equihua y López, 2008). El tratamiento de los temas que se presentan a continuación no pretende ser exhaustivo y debe considerarse sólo como una exposición general que da una idea de los enfoques de trabajo y los métodos de estudio, fundamentándose en una revisión bibliográfica amplia que puede servir a las personas interesadas en la investigación ecológica a largo plazo para adentrarse en ésta.

La estructura de la Red MEX-LTER y su enfoque de trabajo en colaboración es una oportunidad única para enriquecer de manera coordinada todos los tópicos que se describen a continuación, en la medida en que las investigaciones generadas por los miembros vayan creciendo en magnitud, recursos y alcances. Como se expone más adelante, la Red MEX-LTER fomentará la realización de talleres que permitan la identificación de preguntas comunes y metodologías comparables a fin de poder hacer trabajo de síntesis del conocimiento sobre fenómenos ecológicos y los ecosistemas de México.

4.2.1. Productividad primaria

Marco teórico. La productividad primaria es la tasa a la cual las plantas capturan la energía lumínica y la almacenan en los enlaces químicos de compuestos orgánicos, a través de la fotosíntesis; este proceso es la base de las redes tróficas y del flujo de la energía en los ecosistemas (Ricklefs & Miller, 2000), y provee la energía que soporta a todos los organismos, incluyendo a los seres humanos (Odum, 1959; Chapin *et al.*, 2002).

Del total de la biomasa producida por unidad de superficie y tiempo (medida en términos de peso seco de tejido de las plantas, gramos de carbono asimilados o sus equivalentes en energía), que constituye la productividad primaria bruta (PPB), una fracción es utilizada por las mismas plantas durante la respiración, y el resto se invierte en la formación de nuevo tejido que se traduce en el incremento en biomasa, a lo que se denomina productividad primaria neta (PPN). La PPN es una característica importante de los ecosistemas porque es una medida de la cantidad de energía disponible para los seres vivos, además de los productores primarios (Odum y Sarmiento, 1998; Ricklefs & Miller, 2000), y representa el flujo neto de carbono de la atmósfera a las plantas verdes por unidad de área y de tiempo (Schlesinger, 1997).

Del total de PPN, una fracción se canaliza a través de la cadena trófica de pastoreo a los herbívoros y es la base de la productividad secundaria. Varios procesos ecosistémicos están regulados directamente por la cantidad y temporalidad de la energía disponible, como es el

caso, por ejemplo, de los ciclos reproductivos y la actividad de los animales que son controlados por el incremento de la productividad primaria en sistemas con condiciones de estacionalidad. Otra fracción de la PPN también pasa de los productores primarios a otros compartimientos de los ecosistemas por la mortalidad de las plantas y sus partes y la descomposición de materia orgánica del suelo (Olson, 1963; Schlesinger, 1997). En los ecosistemas dominados por elementos arbóreos o arbustivos (bosques, selvas, humedales, matorrales, etc.), esta pérdida por mortalidad se cuantifica como producción de hojarasca y material leñoso, valor que se debe aplicar, junto con las pérdidas por herbivoría, en los cálculos de las estimaciones de PPN total (Schlesinger, 1997).

En ecosistemas terrestres y de humedales, la PPN se divide en productividad primaria neta aérea (PPNA), que es la de las partes de las plantas que se encuentran por encima del suelo, y en productividad primaria neta subterránea (PPNS), que corresponde al sistema radicular. La asignación aérea y subterránea de la productividad neta anual varía dependiendo del tipo de vegetación, el estado sucesional del sistema, la influencia del clima y el régimen hidrológico, y las condiciones del suelo. La PPN total presenta amplias fluctuaciones y varía entre los diferentes ecosistemas terrestres, en función de gradientes espaciales y temporales de factores ambientales limitantes como el clima o del suelo (Whittaker, 1975; Tilman, 1989b).

El término productividad primaria no es un sinónimo de biomasa en pie. El primero se refiere a la tasa de producción de materia orgánica en el ecosistema por unidad de área y tiempo, y se expresa comúnmente en gramos de biomasa o carbono por unidad de superficie y tiempo (comúnmente como $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$). El segundo es la cantidad total de materia orgánica por unidad de área en un momento dado, y se expresa en términos de biomasa por unidad de superficie (por ejemplo g m^{-2} o Mg ha^{-1}). A partir de la cuantificación de la biomasa, puede determinarse la proporción de ésta que representa la cantidad total de carbono orgánico almacenado en las porciones aérea y subterránea del ecosistema.

En ambientes acuáticos existen diferentes tipos de productores primarios, como microalgas,

pastos marinos, fitobentos y fitoplancton; este último constituye el principal grupo de organismos por el monto de su aporte a la productividad primaria. A diferencia de los ambientes terrestres, en los que los productores están distribuidos en gradientes que varían sobre la superficie (por ejemplo, gradientes en la concentración de nutrientes y humedad del suelo a través de la pendiente de una ladera de montaña o en diferentes geoformas), en los océanos, lagunas costeras y lagos profundos, los productores primarios se distribuyen en función de la influencia de gradientes de luz, salinidad y nutrientes que varían con la profundidad. Los productores primarios están limitados por la luz en una escala vertical y también por la disponibilidad de nutrientes (como nitrógeno, fósforo o hierro). La profundidad de compensación es aquella a la cual la fijación de carbono es igual a la disipación (pérdida por respiración). Por ejemplo, cuando el fitoplancton es llevado a la profundidad de compensación, este productor primario libera carbono en lugar de fijarlo. La producción nueva es la proporción de la fotosíntesis que depende del suministro de nitrógeno inorgánico, mientras que la producción regenerada depende del reciclaje de nutrientes de la zona. Al acarreo de nutrientes fuera de la zona por migración vertical del zooplancton se le conoce como bomba biológica (Wetzel, 1983).

Relevancia. La productividad primaria es una variable ecológica fundamental, no sólo porque es una medida de la entrada de energía y asimilación de CO_2 en la biosfera, sino porque es también un importante indicador de las condiciones en que se encuentran los ecosistemas y el estado de un amplio rango de procesos ecológicos (Whittaker, 1975; Schlesinger, 1997).

El creciente interés por analizar el papel de los ecosistemas terrestres, costeros y oceánicos en el ciclo global del carbono ha vigorizado los esfuerzos científicos por cuantificar la PPN, sus fluctuaciones temporales y su distribución en las diferentes regiones del mundo (McGuire *et al.*, 1992; Cramer *et al.*, 1996). Los intentos por determinar los patrones de PPN en la biosfera no se han limitado a obtener una mera cuantificación de los almacenes y flujos de biomasa y nutrientes en los distintos biomas, sino que también han

buscado determinar los factores que dinámicamente los controlan y regulan (Gohlz, 1982). Este interés ha estimulado un campo muy activo de trabajo interdisciplinario para el desarrollo de modelos que generen valores de simulación de variables de productividad y variables climáticas en las distintas regiones de la biosfera (McGuire *et al.*, 1993; Foley, 1994; Peterson y Waring, 1994). La parametrización, calibración, verificación y validación de dichos modelos requiere de mediciones detalladas de campo de las variables que describen los procesos funcionales de los ecosistemas, así como de las variables abióticas y sus interacciones, a una escala espacio-temporal adecuada (Oreskes *et al.*, 1994; Cramer *et al.*, 1996). Con esto no sólo se persigue mantener un nivel de información básico acerca del funcionamiento de los ecosistemas en condiciones naturales y su relación con variables ambientales relevantes, sino también poder predecir las posibles respuestas del ecosistema a los cambios ambientales (McGuire *et al.*, 1993).

Las estimaciones precisas de productividad primaria son la base de un entendimiento sobre la capacidad de almacenamiento y captura del carbono orgánico en el ecosistema, así como de la magnitud de las variaciones geográficas y sus correspondientes variaciones estacionales. Esta información es un componente clave de las estimaciones del balance global de carbono (Janzen, 2004; Lal *et al.*, 2004; Richards y Stokes, 2004; Sabine *et al.*, 2004; Jain *et al.*, 2005; Muller-Karger *et al.*, 2005; Jiménez y Lal, 2006). Las mediciones de PPN son también esenciales para una evaluación de la escala temporal a la cual las perturbaciones, naturales o antropogénicas, afectan los almacenes de biomasa y nutrientes en los ecosistemas. Por esta razón la PPN se ha utilizado como un indicador de tensión ambiental y para analizar las consecuencias de la utilización o extracción de biomasa por arriba de los límites máximos de productividad del ecosistema (Ewe *et al.*, 2006).

Las estimaciones de la productividad primaria son importantes para evaluar el rendimiento potencial de recursos naturales, ya sea la disponibilidad de energía en las cadenas tróficas de ecosistemas acuáticos (Aoki, 2006; Arias-Gonzalez y Morand, 2006; Kupfer *et al.*, 2006), o la

acumulación de biomasa como forraje o madera en ecosistemas terrestres (Watt, 1968; Clark *et al.*, 2001; Chapin *et al.*, 2002). Las estimaciones de productividad primaria aportan también información para evaluar la acumulación de materiales combustibles que alimentan la propagación del fuego y determinan su comportamiento en los incendios forestales (Harrington, 2005). El conocimiento de los factores que controlan la estructura y función de los ecosistemas constituye el marco de referencia para el establecimiento de criterios objetivos para el manejo de ecosistemas y su conservación. Esta información es también de interés potencial en las estrategias de manejo para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. Sólo a través de la creación de un legado de experimentos y observaciones bien diseñados sobre el funcionamiento del ecosistema será posible probar, validar y comparar modelos de simulación y predecir su funcionamiento bajo escenarios ambientales futuros

Métodos y variables. Existen diversas técnicas para medir la productividad primaria en los ecosistemas o en plantas individuales. Su utilización varía dependiendo del tipo de ecosistema, ya sea este terrestre o acuático (Sala y Austin, 2000; Sala *et al.*, 2000b; Hall *et al.*, 2007; Knapp *et al.*, 2007). Por ejemplo en pastizales y matorrales, el método de cosecha ha sido el más común para medir la productividad de las partes aéreas de las plantas; se mide la biomasa acumulada durante la temporada de crecimiento, después de cosecharla, secarla y pesarla. Esta técnica ha sido adaptada en ambientes acuáticos en el caso de las fanerógamas y las microalgas. En bosques y selvas se ha cuantificado la caída de hojarasca, la masa de follaje en el máximo de desarrollo foliar y el crecimiento en diámetro y altura de los árboles, estimando la biomasa leñosa a través ecuaciones alométricas; para las herbáceas y las raíces se utilizan métodos de cosecha.

Uno de los primeros métodos utilizados para cuantificar la productividad del fitoplancton de los ecosistemas acuáticos, fue el de pares de botellas de incubación, midiendo las diferencias en las concentraciones de oxígeno entre una botella “clara”, que permite el paso de la luz solar y por lo tanto la fotosíntesis, y una botella “oscura”, en la cual el oxígeno es consumido por la respira-

ción (Howarth y Michaels, 2000). Actualmente se utilizan otros métodos, como el uso de isótopos radioactivos de carbono 14 (^{14}C) y técnicas de fluorimetría, que miden el intercambio gaseoso y permiten estimar la productividad (Howarth y Michaels, 2000); también se puede medir la concentración de clorofila y relacionarla con las tasas de productividad primaria en los ecosistemas acuáticos a través de imágenes de satélite (Wetzel, 1983; Schlesinger, 1997).

Existe una estrecha relación entre los rasgos estructurales y los procesos funcionales de los ecosistemas. Estos dos elementos, estructura y función, desempeñan un papel crítico en el control del flujo de energía y materia entre la tierra y la atmósfera. En ecosistemas terrestres y humedales, la estructura está determinada por la proporción de las formas de vida dominantes, el perfil vertical de los estratos de vegetación, el patrón horizontal de distribución de las plantas, las variaciones espaciales de densidad, área basal y cobertura de las especies, y la distribución de tamaños (diámetro y altura de las plantas) (Muller-Dumbois y Ellenberg, 1974; Chapman, 1976; Kent y Coker, 1992; Stohlgren, 1995; Mitsch y Gosselink, 2000). Estos atributos varían en magnitud dependiendo del espectro de formas de crecimiento, la diversidad y dominancia relativa de las especies, las condiciones particulares de cada sitio (clima, relieve, morfología, suelos) y la influencia de los regímenes de perturbación natural o antropogénica. En los ecosistemas acuáticos la estructura y funcionamiento están determinados por gradientes de luz, temperatura, oxígeno y salinidad que varían con la profundidad y la influencia de las corrientes y mareas (Wetzel, 1983).

En ecosistemas de crecimiento rápido, como pastizales y humedales dominados por herbáceas (tulares, popales y carrizales, por ejemplo), existen tres métodos para examinar la PPN. El método clásico consiste en medir la biomasa pico o máxima e igualar este valor con el de productividad anual. En este caso se asume que no existe almacén de biomasa de una estación de crecimiento a la otra, que la biomasa mínima es cero y que ésta se incrementa hasta un punto (la biomasa pico) después del cual la senescencia comienza. Otro método reduce el efecto de

acumulación entre temporadas estimando tanto la biomasa máxima como la mínima. Este método, sin embargo, aún asume un incremento monótono de biomasa. Ambos métodos tienen el problema de ignorar picos intermedios de producción de biomasa, de tal suerte que un tercer método reduce el supuesto del incremento monótono de biomasa, incluyendo múltiples estimaciones y tomando la suma de las diferencias entre evaluaciones consecutivas. En vista de que la producción primaria subterránea en pastizales puede alcanzar hasta 80%, es fundamental su determinación para estimar la PPN. Los métodos disponibles incluyen la extracción directa y evaluación de biomasa de raíces, aunque se deben establecer criterios con respecto al método de extracción, la frecuencia de muestreo y el método para estimar la PPN subterránea. Otros métodos utilizados incluyen los núcleos para crecimiento de raíces (*ingrowth cores*, Robertson *et al.*, 1999), el uso de isótopos de ^{14}C para estimar coeficientes de retorno, minirizotrones, etc. (Lauenroth *et al.*, 2000).

La medición directa de PPN en el campo no es una cuestión sencilla. Los métodos para estimar la PPN aérea y subterránea en ecosistemas terrestres y costeros han sido revisados en detalle por Newbould (1967), Whittaker y Marks (1975), Singh *et al.* (1975), Long *et al.* (1992), Robertson *et al.* (1999), Sala *et al.* (2000b) y otros. Es recomendable seguir los mismos marcos conceptuales, métodos estandarizados y herramientas técnicas de evaluación en todos los estudios de productividad, para permitir comparaciones entre ecosistemas con el menor margen de error posible.

La información básica que se requiere para una descripción de la estructura y productividad de un ecosistema terrestre incluye los siguientes aspectos:

- a) El establecimiento de parcelas permanentes, transectos o estaciones fijas de muestreo, para su monitoreo a largo plazo, con sus descriptores de tamaño, forma, ubicación y condiciones de sitio. El número de parcelas o estaciones dependerá del ecosistema y las condiciones particulares de cada sitio.

- b) La obtención de datos de la estructura de la vegetación a través de censos en las parcelas permanentes. Estos incluyen mediciones por especie de los valores de cobertura, densidad y área basal de tallos mayores de 2.5 cm de diámetro medido a 1.30 m de altura desde el suelo —diámetro “a la altura del pecho” (DAP) o “diámetro normal” (DN)—, y cálculos de los valores de importancia de las plantas vasculares. En el caso de pastizales se requiere de estimaciones de cobertura basal total y por especie, y estimaciones de densidad, frecuencia y valor de importancia.
- c) Una medición de los incrementos temporales en biomasa de plantas. Esto requiere de un seguimiento continuo de los cambios del diámetro de plantas leñosas marcadas en cada parcela, y del cálculo de relaciones alométricas que permitan relacionar los cambios en tamaño con estimaciones de los cambios en biomasa. En el caso de pastizales, pueden utilizarse mediciones periódicas basadas en métodos de cosecha.
- d) Una investigación de los cambios temporales de los cocientes de cobertura suelo/planta o de la variación del índice de área foliar (IAF) en el espacio. El IAF es una importante característica estructural ya que el dosel de vegetación es el compartimento donde ocurren los procesos de fotosíntesis, transpiración, interceptación de lluvia y deposición de polvos atmosféricos. La estimación de las variaciones estacionales del IAF es, por lo tanto, un indicador de la variación temporal de estos procesos. El IAF es el principal descriptor del dosel de vegetación que permite establecer una adecuada comparación entre sitios (Maass *et al.*, 1995).
- e) Monitoreo mensual de la caída de hojarasca como variables clave de productividad en ecosistemas dominados por elementos leñosos arbóreos o arbustivos. Normalmente se utilizan trampas de malla, de forma cónica y 50 cm de diámetro, para capturar la hojarasca que se desprende del dosel. El número de trampas y su localización dentro de cada parcela depende de las condiciones particulares de cada sitio. Las trampas se vacían a intervalos regulares, normalmente en una base mensual y hasta quincenal en la época de lluvias. El material colectado se separa en componentes para estimar la contribución relativa de las distintas fracciones de la hojarasca (hojas, estructuras reproductivas y material leñoso). Se hacen determinaciones de peso seco utilizando un horno de secado de ventilación y una balanza analítica de precisión. La determinación por medio de análisis químicos (siguiendo protocolos estándares de laboratorio) del contenido en la hojarasca de los principales nutrientes (N, P, K, Ca, Mg y Na) es necesaria para una estimación del flujo de nutrientes que regresan al suelo por esta vía.
- f) Se requieren colectas regulares de la cantidad promedio de mantillo en pie para determinar la cantidad de hojarasca acumulada en el suelo y analizar la dinámica espacio-temporal del mantillo en el ecosistema. El muestreo consiste en recoger del suelo el material orgánico que yace sobre la superficie en un área definida por el contorno de un molde circular de 20 cm de diámetro. El molde se va posicionando sistemáticamente a lo largo de transectos en cada parcela. El material se seca y pesa siguiendo el mismo protocolo estándar de laboratorio utilizado en el análisis de la hojarasca. El valor promedio anual de mantillo en pie se utiliza junto con el valor anual de producción de hojarasca para estimar la tasa de descomposición en cada sitio.
- g) En una etapa más avanzada del desarrollo del estudio de productividad se inicia la exploración de los cambios regionales de la productividad primaria neta que deben ser abordados con técnicas de percepción remota y la incorporación de los datos de campo específicos, tales como estimaciones de biomasa aérea e índices de área foliar. Fotografías aéreas e imágenes de satélite de alta resolución se usan para examinar los cambios de vegetación a nivel del paisaje.
- En ecosistemas forestales, donde dominan árboles o arbustos, la cuantificación de material leñoso caído es importante como un componente de la productividad primaria, pero también por

su papel ecológico como elemento fundamental del hábitat (Harmon *et al.*, 1986) y por su importancia en el comportamiento del fuego en incendios forestales, así como en el almacenamiento y emisiones de carbono (Sandberg *et al.*, 2001). Una revisión de los métodos para evaluar, caracterizar y cuantificar la hojarasca y el material leñoso en ecosistemas forestales se encuentra en los trabajos de van Wagner (1968), Brown (1974), Harrington (2005) y Morfín *et al.* (2006).

Infraestructura. Los estudios de productividad primaria requieren la persistencia sin alteración de los sitios permanentes de muestreo para el adecuado seguimiento de variables a largo plazo. Es importante que se garantice que las parcelas permanentes en ecosistemas terrestres o las estaciones de muestreo en ecosistemas acuáticos permanezcan aisladas de cualquier interferencia que altere las mediciones. Es conveniente contar con un laboratorio equipado con aparatos electrónicos especializados para el análisis de nutrientes en material vegetal, tales como autoanalizador, espectrofotómetro de absorción atómica y de luz ultravioleta, analizador de carbono y nitrógeno, digestores, agitadores, centrífugas, hornos de secado, mufla, autoclave, molino, horno-ventilador, computadoras, etc. También se requiere de equipo de cristalería y materiales necesarios para la preparación y procesamiento de muestras. El laboratorio debe proveer el equipo y materiales para trabajo en campo, como equipo de muestreo de material vegetal, bolsas, costales, cintas, etiquetas, marcadores, etc. También debe proporcionar los mapas, fotografías aéreas o imágenes de satélite de alta resolución, equipo para fotointerpretación y el *software* correspondiente.

4.2.2. Dinámica del agua, carbono y nutrientes

Marco teórico. Los ecosistemas están constituidos por el conjunto de componentes bióticos (plantas, animales, hongos y microorganismos) y abióticos (atmósfera, agua, rocas y minerales, radiación solar), que interactúan en un espacio y tiempo determinados, a través de flujos de energía y materia que están estrechamente acoplados (Lindeman, 1942; Teal, 1962; Golley *et al.*, 1975; Likens & Bormann, 1977; Rodríguez,

1999; Ricklefs & Miller, 2000; Chapin *et al.*, 2002; Jørgensen, 2009). Mediante estos procesos biogeoquímicos de transferencia y reciclaje de la materia, el oxígeno, el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno y el fósforo, junto con una larga lista de otros elementos adicionales, fluyen, se combinan, se almacenan y se reciclan en los ecosistemas (Schlesinger, 1997). La biogeoquímica es uno de los campos centrales de la ecología de ecosistemas, con aplicaciones importantes en cuestiones tales como el entendimiento de los factores que controlan el ciclo hidrológico, la relación del ciclo del carbono y los gases con efecto de invernadero en la regulación del clima, el papel de los nutrientes como factores limitantes de la producción primaria y los impactos de las alteraciones del ambiente por la adición de elementos y compuestos químicos (por ejemplo en la contaminación, la eutrofización, la acidificación de los océanos, el enriquecimiento con nitrógeno o la lluvia ácida) o por su pérdida (en el caso de la erosión) (Smil, 1997; Burke *et al.*, 1998). El estudio de los ciclos y la dinámica del agua, el carbono y los nutrientes ha sido uno de los temas fundamentales en los inicios y el desarrollo de la investigación ecológica de largo plazo (véase por ejemplo Golley, 1975, 1993; Hopkinson & Day, 1977; Bormann & Likens, 1978; Likens & Bormann, 1995).

El agua es un factor limitante en todos los ecosistemas, cuya disponibilidad regula la productividad primaria, por lo que es básico contar con conocimiento detallado de las entradas, salidas y flujos de agua a través de las fronteras que definen a los ecosistemas. El entendimiento de los factores que regulan el ciclo del agua es fundamental para un manejo adecuado de los ecosistemas que permita mantener la provisión de un servicio ecosistémico indispensable para la sociedad (Bishop y Landell-Mills, 2003). El agua es también el principal medio para el movimiento de nutrientes dentro de los ecosistemas y entre éstos. Por ejemplo, las entradas de precipitación, las pérdidas por lixiviación, o el efecto de las mareas son componentes críticos del ciclo de nitrógeno en los ecosistemas. La materia orgánica controla no solamente la capacidad de retención del agua, sino también la dinámica y retención de los nutrientes. La entrada y salida

de los nutrientes en un ecosistema está estrechamente relacionada con el ciclo hidrológico y la productividad primaria, y por lo tanto con fenómenos como la erosión, la eutrofización y el rendimiento de los recursos bióticos bajo aprovechamiento.

Los ciclos de muchos de los elementos químicos esenciales para la vida están acoplados con el ciclo del agua. Una parte importante del hidrógeno y el oxígeno que fluyen y se reciclan en el ecosistema, lo hacen en forma conjunta como moléculas de agua. El agua es uno de los principales factores limitantes para los organismos y participa de una manera directa y determinante en la gran mayoría de los procesos funcionales de los ecosistemas. Generalmente más de 50% de la energía que entra a un ecosistema terrestre es utilizada para evaporar agua, mediante los flujos de calor latente (Waring y Schlesinger, 1985). Elementos minerales indispensables para el crecimiento de las plantas, como nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio, potasio y azufre (N, P, Ca, Mg, K y S), fluyen disueltos en el agua en forma iónica. Es por ellos que el análisis del ciclo hidrológico de los ecosistemas es esencial para el entendimiento de su dinámica (Likens & Borman, 1995).

El carbono asociado al oxígeno entra y sale del ecosistema en forma de bióxido de carbono. Este carbono, asimilado como CO_2 por las plantas, es utilizado en la elaboración de compuestos orgánicos tales como los almidones y azúcares. No obstante que las plantas sólo utilizan menos de 2% de la energía radiante que entra al ecosistema (Odum, 1959; Chapin *et al.*, 2002), la energía fijada y almacenada en los enlaces de carbono mediante la fotosíntesis constituye la principal fuente de energía para el resto de los organismos. Es por ello que el análisis de la dinámica del carbono es la clave para comprender la dinámica energética de los ecosistemas.

Mientras que el nitrógeno constituye uno de los gases más abundantes de la atmósfera (representa 71% de la composición de ésta), su disponibilidad para las plantas y, por ende, para el resto de los organismos de un ecosistema, es sumamente limitada (Likens & Borman, 1995; Schlesinger, 1997). Esto obedece al hecho que las plantas, tanto en ecosistemas terrestres como

acuáticos, no asimilan el nitrógeno molecular (en forma de N_2), sino que sólo lo hacen en ciertas formas iónicas como el amonio (NH_4^+) y el nitrato (NO_3^-). No obstante que existen procesos naturales que fijan el nitrógeno atmosférico (como la acción de algunos microorganismos, el vulcanismo o las descargas eléctricas de rayos) éstos son muy limitados, lo que se traduce en una baja disponibilidad de nitrógeno en la mayoría de los ecosistemas terrestres. Así el análisis de las transformaciones de nitrógeno en los ecosistemas es particularmente importante para entender su dinámica productiva.

Las actividades humanas han alterado significativamente los ciclos de nutrientes (Vitousek *et al.*, 1986; Smil, 1997). Uno de los casos más críticos es el de la alteración de la química atmosférica por las emisiones de gases con efecto de invernadero, como el carbono, el metano y los óxidos de nitrógeno; esto modifica las propiedades físicas de retención de calor por la atmósfera, alterando el sistema climático mundial (IPCC, 2007). La utilización de combustibles fósiles a partir de la Revolución Industrial es una de las principales fuentes de emisiones de compuestos de carbono que contribuyen al cambio climático global (Munasinghe y Swart, 2005). Otra consecuencia de la alteración del ciclo del carbono es la acidificación de los océanos que puede tener graves consecuencias para la diversidad biológica y el funcionamiento de los ecosistemas marinos (Sabine *et al.*, 2004; Guinotte y Fabry, 2008; Doney *et al.*, 2009).

En el caso del ciclo del nitrógeno, el fósforo y el azufre, el uso de fertilizantes en la agricultura, las descargas de aguas residuales urbanas e industriales, la erosión de los suelos como consecuencia de las transformaciones del paisaje, y la quema de combustibles fósiles, han provocado alteraciones tales como la contaminación atmosférica, la deposición ácida, la eutrofización de cuerpos de agua, y el enriquecimiento o empobrecimiento de ciertos ecosistemas por los cambios en las entradas o salidas de estos nutrientes (Likens & Bormann, 1995; Schlesinger, 1997; Smil, 1997). En regiones costeras, lagos y ríos el proceso de eutrofización causado por los aportes de fósforo y nitrógeno ha afectado dramáticamente la estructura y función de los ecosiste-

mas (Herrera-Silveira *et al.*, 1999, 2002; Rabalais *et al.*, 2001; Medina-Gómez & Herrera-Silveira, 2003, 2006; Scavia *et al.*, 2003; Smith *et al.*, 2006; Turner *et al.*, 2006).

Relevancia. El entendimiento de la manera como la materia y la energía fluyen entre los componente bióticos y abióticos de los ecosistema ha sido objeto de estudio de los ecólogos, limnólogos y edafólogos desde hace tiempo (Likens, 1989; Golley, 1993). Procesos como la fotosíntesis, la nutrición de las plantas, el intercambio gaseoso, la descomposición microbiana, la mineralización de la materia orgánica y la intemperización de la roca, por mencionar sólo algunos aspectos, se han analizado con gran detalle, sobre todo a escalas espaciales y temporales pequeñas (del orden minutos, horas o días, y en sistemas como hojas, raíces, especies individuales, experimentos de laboratorio y parcelas experimentales). Los estudios de estos procesos a mayores escalas de tiempo (de varios años o décadas), así como a escala espaciales más grandes (regionales, continentales y globales), son aún incipientes. Estos estudios son necesarios, ya que los procesos biogeoquímicos se dan a diferentes escalas espaciales y temporales (Chapin *et al.*, 2002). Así mismo, la transformación y degradación de los ecosistemas como consecuencia de las actividades humanas (expansión e intensificación de la agricultura, explotación de los recursos forestales, urbanización, industrialización, construcción de infraestructura, desviación de agua para diversos usos, disposición de desechos urbanos e industriales, etc.), trae consigo modificaciones de los procesos biogeoquímicos, cuyos efectos sobrepasan las áreas directamente afectadas y, muchas veces, se manifiestan de manera retardada o con efectos de retroalimentación, que en casos extremos puedan desestabilizar a los ecosistemas (Peters *et al.*, 2000). Muchos problemas tales como el cambio climático, la eutrofización, la lluvia ácida, la anoxia en zonas costeras, etc., están relacionados con la alteración de los ciclos de biogeoquímicos (Smil, 1997; Galloway *et al.*, 2003, 2004; Townsend *et al.*, 2003; Howarth, 2005; Boesch, 2006; Boyer *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2006). Los estudios biogeoquímicos a largo plazo y en áreas extensas, no sólo permitirán separar los efectos de eventos

de perturbación de la variación natural en la dinámica de los ecosistemas, sino además permitirán detectar relaciones causa efecto de manera más precisa (Townsend *et al.*, 2003; Howarth y Marino, 2006; Howarth *et al.*, 2006).

Los estudios ecológicos a largo plazo sobre procesos hidrológicos y biogeoquímicos han generado contribuciones esenciales a la ecología, con aplicaciones prácticas importantes. Ejemplos de esto son los trabajos sobre la dinámica del agua y nutrientes en cuencas experimentales en Coweeta, Hubbard Brook, Luquillo o Chama (véanse por ejemplo Swank & Douglas, 1974; Douglas & Swank, 1975; Bormann & Likens, 1979; Swank & Crossley, 1988; Likens, 1989; Likens & Borman, 1989; Maass *et al.*, 2002). El estudio de los flujos de energía y los ciclos de nutrientes ha sido también un importante componente de la investigación ecológica en ecosistemas marinos y costeros y en lagos, ríos y humedales (Schlesinger, 1991; Mann & Lazier, 2000; Galloway *et al.*, 2003; Boyer *et al.*, 2006; Smith *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2007).

Métodos. El estudio a largo plazo de la dinámica del agua, carbono y nutrientes ha sido abordado a través de diversos métodos, los cuales incluyen el monitoreo meteorológico e hidrológico, la cuantificación del contenido de elementos y compuestos químicos en diferentes compartimientos del ecosistema, la elaboración de “presupuestos” de entrada y salida de nutrientes y su relación con las variables ambientales que influyen en estos procesos, e incluso la realización de experimentos en los que se modifican componentes del ecosistema (por ejemplo la cobertura vegetal o el flujo del agua) o se adicionan nutrientes (véanse ejemplos en Douglas & Swank, 1975; Bormann & Likens, 1979; Swank & Crossley, 1988; Schlesinger, 1997; Likens, 1989; Likens & Borman, 1989; Tilman, 1989; Maass *et al.*, 2002). A continuación se describen algunas de las variables relevantes que deben ser consideradas.

Agua. El estudio de la dinámica del agua en los ecosistemas implica el monitoreo de variables meteorológicas e hidrológicas como la precipitación pluvial y el flujo de agua en los cauces, utilizando estaciones fijas para la toma de datos. En ecosistemas terrestres debe estimarse la in-

tercepción del agua por el dosel y el mantillo, el escurrimiento superficial, la infiltración al suelo, los flujos de masas de aguas subterráneas, la evapotranspiración, y la variación en la humedad en el suelo. En ecosistemas costeros, de agua dulce y marinos, es importante caracterizar el movimiento de las corrientes, los cambios en el nivel de la columna de agua y los flujos de agua aportados por las mareas, la descarga de los ríos y los escurrimientos superficiales o subterráneos provenientes de los terrenos adyacentes.

Carbono. El estudio de la dinámica del carbono está estrechamente relacionado con el de la productividad primaria, ya descrito en la sección anterior. Además de las mediciones de biomasa, tasas de fotosíntesis y productividad primaria, es necesario determinar tasas de descomposición de la materia orgánica, respiración del suelo y herbivoría, así como contenidos de materia orgánica en el suelo y el agua.

Nutrientes. Debe estimarse el contenido de nutrientes (tales como N, P, K, Ca, Mg, S) en diferentes compartimientos del ecosistema (por ejemplo en la biomasa de plantas, el mantillo, el suelo y el agua), las entradas y salidas de nutrientes del ecosistema por deposición húmeda y seca, escorrentía, lixiviación, erosión y sedimentación, movimientos de animales, la transferencia de nutrientes por lavado del dosel, absorción de minerales por las plantas, adsorción de minerales en el suelo, mineralización de la materia orgánica y transformaciones microbianas. Los métodos utilizados incluyen análisis químicos de materiales en los compartimientos del ecosistema y en los flujos entre éstos. En varios casos pueden utilizarse isótopos radioactivos como trazadores de los flujos. La manipulación experimental de los compartimientos del ecosistema (por ejemplo, la manipulación de la vegetación o la adición de nutrientes), han sido utilizados para explorar el comportamiento del flujo de nutrientes en el ecosistema y los factores que lo controlan. Se han utilizado, por ejemplo, pequeñas cuencas que presentan condiciones similares, en las cuales se realiza el monitoreo de las variables relevantes por un lapso suficiente para calibrarlas, y después se sujetan a distintos tratamientos (por ejemplo eliminación de la cobertura vegetal, fertilización, aplicación de prácticas

de manejo agrícola o forestal; véanse los trabajos de Bormann & Likens, 1979; Likens & Bormann, 1995; Maass *et al.*, 2002).

Variables ambientales. Otras variables meteorológicas, como la radiación neta, albedo, radiación fotosintéticamente activa (RFA), velocidad y dirección del viento, humedad y temperatura del aire, y el seguimiento de cambios en la geomorfología (especialmente en ecosistemas costeros y en ríos, así como en ecosistemas de montaña), son importantes como factores que influyen en la dinámica del agua, carbono y nutrientes. Es importante también el estudio y monitoreo de factores derivados de la influencia humana como las descargas de contaminantes, los cambios en el uso y cobertura del suelo, intervenciones de manejo, modificación del flujo hidrológico, entre otras, cuando el objetivo de los estudios es entender la dinámica de ecosistemas sujetos a perturbaciones antropogénicas.

Infraestructura. Ciertas herramientas específicas son necesarias para analizar la biogeoquímica de los ecosistemas a diferentes escalas. Por ejemplo, al nivel de parcelas experimentales en ambientes terrestres y costeros (húmedales), se requiere equipo manual como lisímetros, cámaras de incubación, nucleadores de suelo, infiltrómetros y porómetros. A escalas mayores, como es el caso de cuencas hidrográficas, es necesario contar con sitios permanentes o estaciones de investigación con sistemas de aforo y muestreo del agua de escorrentía, así como una red de pluviógrafos y colectores de lluvia indirecta (*throughfall*). Torres micrometeorológicas equipadas con sensores de radiación, de velocidad y dirección del viento, así como gradientes de humedad y de CO₂ están siendo utilizados para estimar evapotranspiración e intercambio de carbono a escalas de varias hectáreas. Los sistemas de información geográfica y los medios de percepción remota, tanto aérea como satelital, son indispensables para analizar los fenómenos de cambio de cobertura vegetal a escalas regionales. La utilización de modelos matemáticos y de simulación es clave para analizar, combinar y sintetizar la información generada a diferentes escalas espaciales. Equipos como autonormalizadores y espectrofotómetros permiten hacer el trabajo de determinación química de manera más

eficiente (en tiempo y costo) así como con una mayor sensibilidad. La utilización de isótopos radioactivos, y más recientemente la isotopía estable son herramientas ampliamente usadas en estudios biogeoquímicos (Fry, 2006).

4.2.3. Biodiversidad

Marco teórico. Diversidad biológica —o de manera abreviada, biodiversidad— se refiere en términos generales a toda la variedad de las distintas formas de vida existentes en la biosfera (Wilson, 1992; Lévêque y Mounolou, 2003). El concepto de biodiversidad abarca un amplio espectro de escalas, desde la variación genética dentro de las especies hasta los diferentes tipos de biomas en el planeta (Hooper *et al.*, 2005). El término biodiversidad se aplica tanto al concepto científico que se refiere a la variedad de formas de vida, como a entidades mensurables, al mismo tiempo que es una construcción sociopolítica relacionada con la conservación (Shachak *et al.*, 2005).

La biodiversidad puede ser descrita y medida en términos del número y abundancia de entidades tales como genotipos, especies, ecosistemas o hábitats y tipos de cobertura en el paisaje, la equidad de su distribución, las diferencias en rasgos funcionales y sus interacciones (Hooper *et al.*, 2005; Shachak *et al.*, 2005).

Con frecuencia la biodiversidad ha sido utilizada como un sinónimo de la *riqueza* de especies, esto es, el número de especies presentes en un área determinada. Esta es sin duda la acepción más popularizada del término. La diversidad de especies, además de ser caracterizada como riqueza (número de especies), es descrita como la abundancia relativa de las especies (*equidad* o *uniformidad*), la relación entre el número de especies y la abundancia de individuos por especie (*índices de diversidad*), la variación en la presencia o ausencia de las especies (*composición*), y la variación espacial o temporal de estas propiedades (Symstad, 2003). La diversidad de especies puede ser descrita, inventariada, medida o analizada a diferentes niveles: como la diversidad local o de microescala en un sitio de muestreo o comunidad (diversidad α), como la

diversidad de mesoescala en un conjunto de comunidades en un paisaje (diversidad γ) o como la diversidad de macroescala en una región (diversidad ϵ); también puede ser medida como la diferencia entre comunidades o la variación de la composición de especies a través de distintos sitios en gradiente ambientales o entre hábitats o comunidades a mesoescala (diversidad β) o entre áreas geográficas extensas a macroescala (diversidad δ) (Whittaker, 1975; Halffter y Ezcurra, 1992; Schneider 2009).

Además de la diversidad taxonómica o de especies, el término biodiversidad se aplica también a la variación de genotipos dentro de una población de una misma especie (*diversidad genética*), a la presencia de distintos *grupos funcionales* de especies presentes en una comunidad (*diversidad funcional*) e, incluso, a la variedad de ensamblajes de especies en distintas comunidades, hábitats o ecosistemas (*diversidad ecológica*) (Hunter, 1996; Lévêque y Mounolou, 2003).

La diversidad de especies es una medida de la heterogeneidad de los ecosistemas y es una manifestación de procesos evolutivos, biogeográficos y ecológicos (Halffter y Ezcurra, 1992; Wilson, 1992; Shachak *et al.*, 2005). Varía con relación al tipo de ecosistema y a la influencia de factores como los gradientes ambientales limitantes, la variación estacional de algunos de éstos, la productividad primaria y los regímenes de perturbación (Whittaker, 1975; Huston, 1994; Bisby *et al.*, 1995; Lévêque y Mounolou, 2003). La caracterización de la composición de especies a través de inventarios debe considerarse como un aspecto básico de la información necesaria en los sitios de investigación ecológica a largo plazo. Los sitios de investigación deben contar con listados de especies, al menos de los principales grupos taxonómicos de interés.

La relación entre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas ha sido un viejo tema de interés para los ecólogos (Hooper *et al.*, 2005) y una cuestión central en numerosos proyectos de investigación ecológica de largo plazo (Symstad *et al.*, 2003. Véanse por ejemplo Tilman, 1999; Hector *et al.*, 1999; Tilman *et al.*, 2001). Existe una relación fundamental entre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas, y su entendimiento es relevante para el manejo de los ecosistemas (Martínez-Ramos,

2009). Los atributos de las especies y sus interacciones intervienen directamente en los flujos de energía y materiales, regulan las tasas de los procesos de los ecosistemas y determinan las respuestas a agentes de perturbación, de modo que conocer el papel de la diversidad de especies y grupos funcionales en el funcionamiento de los ecosistemas, a diferentes escalas espaciales y temporales, es una cuestión importante y un tema actual de debate en ecología (Kinzig *et al.*, 2001; Symstad *et al.*, 2003).

La variedad de formas de vida, genes, poblaciones, especies, grupos funcionales, comunidades y ecosistemas varía ampliamente en los ambientes terrestres y acuáticos. Los patrones de variación y el papel de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas no están plenamente entendidos (Chapin *et al.*, 1997; Grime, 2001; Tilman *et al.*, 2001; Hector *et al.*, 1999; Symstad *et al.*, 2003), ni tampoco las consecuencias que implican las transformaciones ambientales antropogénicas y la extinción de especies en el contexto del cambio ambiental global (Dale *et al.*, 2001; Parmesan y Yohe, 2003; Pounds *et al.*, 2006). Por estas razones, es crítico avanzar en el conocimiento de los patrones de distribución de las especies en el tiempo y el espacio, los cambios en la composición de las comunidades, sus implicaciones en los procesos de los ecosistemas y el impacto de las actividades humanas y las prácticas de manejo del hábitat y los recursos bióticos. Esto incluye el entendimiento tanto de los factores físicos y biológicos, como de los factores sociales, económicos y culturales relacionados.

Una revisión de la literatura científica sobre el tema de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas (Hooper *et al.*, 2005) estableció que las características funcionales de las especies y sus interacciones (como competencia, facilitación, mutualismo, enfermedades o depredación) influyen fuertemente en las propiedades de los ecosistemas; la abundancia relativa por sí sola no es siempre un buen indicador de la importancia de las especies a nivel del ecosistema, ya que tanto aquellas especies dominantes como otras que son raras desempeñan un papel importante (por ejemplo especies clave, especies sombrilla y las consideradas como “ingenieros

ecológicos”). El mismo estudio señala que la alteración de la biota en los ecosistemas por las invasiones y extinciones causadas por las actividades humanas tiene impactos negativos en la capacidad de los ecosistemas de generar bienes y servicios, y que muchos de esos cambios son difíciles, demasiado caros o incluso imposibles de revertir o reparar con soluciones técnicas. Además de esto, se ha encontrado que los efectos de la pérdida de especies o los cambios en composición difieren entre tipos de ecosistemas y en sus distintas propiedades.

La conservación de la biodiversidad en los ecosistemas es indispensable para mantener su resiliencia y funcionamiento en diferentes condiciones ambientales que varían espacial y temporalmente. Ciertas combinaciones de especies son complementarias en el uso de los recursos disponibles y pueden aumentar las tasas de productividad y retención de nutrientes (Tilman, 1999); la susceptibilidad de las comunidades a la invasión de especies exóticas generalmente decrece al aumentar la riqueza de especies (Vitousek *et al.*, 1996); tener un conjunto de especies que responde de manera diferente a distintas perturbaciones ambientales puede estabilizar las tasas de los procesos de los ecosistemas en respuesta a los eventos de perturbación (o disturbios) y la variación en las condiciones bióticas y abióticas (véase Hooper *et al.*, 2005 para una amplia revisión sobre el tema).

El trabajo de Hooper *et al.* (2005) señala también varios temas que requieren de estudios más profundos. Por ejemplo, el estudio de la relación entre la diversidad taxonómica, la diversidad de grupos funcionales (grupos de especies con efectos similares sobre un proceso ecosistémico específico o que dan respuestas similares a las condiciones ambientales) y la estructura de la comunidad es importante para identificar y comprender los mecanismos de los efectos de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas. Otros aspectos de interés son entender la complejidad de la variación en la composición de especies en múltiples niveles tróficos, la experimentación a largo plazo de las respuestas de la biodiversidad a una gran variedad de regímenes de perturbación, y la retroalimentación entre las respuestas de la biodiversidad y los cambios

en las propiedades de los ecosistemas. También es importante entender cómo varía la biodiversidad en el contexto del paisaje y de procesos como la sucesión (Shachak *et al.*, 2005).

Relevancia. El estudio de la biodiversidad es importante para fines prácticos, dada la relación entre el funcionamiento de los ecosistemas y la generación de servicios ambientales (véase www.diversitas-international.org; Hooper *et al.*, 2005; Martínez-Ramos, 2009), la importancia y valor económico de los recursos bióticos, y el interés en la conservación biológica por razones éticas, estéticas y culturales, sobre todo en el contexto de problemas como la extinción de especies, la pérdida de diversidad genética y el cambio ambiental global (Wilson, 1992; Hunter, 1996; Lévêque y Mounolou, 2003; Adams *et al.*, 2004; Hooper *et al.*, 2005).

Las condiciones, los procesos y las funciones que caracterizan tanto a los ecosistemas naturales como transformados, en los cuales la biodiversidad es fundamental, son esenciales para los seres humanos, ya que proporcionan una serie de servicios ecosistémicos de los que depende la sociedad (Constanza *et al.*, 2003). Estos servicios incluyen un conjunto de factores esenciales para la vida en el planeta, que tienen que ver con la capacidad de producir recursos naturales, la regulación de las condiciones ambientales que hacen posible la vida misma y con factores culturales. Por ejemplo, entre los servicios ecosistémicos pueden señalarse el mantenimiento y regulación de la composición gaseosa de la atmósfera de la que depende la calidad del aire que respiramos, así como el control del clima global; la regulación del ciclo hidrológico, que provee agua dulce; la absorción y descomposición de desechos y el reciclaje de nutrientes; la generación y preservación de los suelos y el mantenimiento de su fertilidad; el control de organismos nocivos que afectan a los cultivos y a los bosques o que transmiten enfermedades a los seres humanos; la polinización de cultivos, y el mantenimiento de un enorme acervo genético del cual la humanidad obtiene recursos fundamentales como los cultivos agrícolas, animales domésticos, medicinas y diversas materias primas esenciales para la economía (Daily, 1997; Limburg *et al.*, 2002; Pickett *et al.*, 2004).

La calidad de los servicios ambientales depende en gran medida de las condiciones en las que se encuentren los sistemas naturales. En este sentido es extremadamente relevante evaluar la relación entre la diversidad biológica y las funciones de los ecosistemas de las que se derivan los servicios ambientales (Daily, 1997; Symstad *et al.*, 2003; Hooper *et al.*, 2005; Balvanera *et al.*, 2009; Scott-Morales *et al.*, 2008; Sarukhán *et al.*, 2009). Un problema fundamental para determinar tales relaciones es la falta de información acerca de la variabilidad temporal y espacial en la diversidad biológica en sistemas naturales, transformados o degradados.

En las últimas décadas la pérdida de la diversidad biológica se ha convertido en uno de los problemas ambientales globales más críticos (Ehrlich y Ehrlich, 1981; Wilson, 1992; Lévêque y Mounolou, 2003) y se prevé que la tasa de extinción de especies por causa de cambio ambiental global aumentará en las próximas décadas (Sala *et al.*, 2000b; Rockström *et al.*, 2009). Muchas poblaciones y especies se han extinguido sin que se haya podido siquiera evaluar, en la mayoría de los casos, los impactos negativos de esas extinciones en el funcionamiento de los ecosistemas y sus consecuencias para la sociedad.

El estudio de la biodiversidad y su papel ecológico es particularmente importante en un país como México, considerado como uno de los más ricos en especies y ecosistemas en el mundo (Mittermeier *et al.*, 1997; Ramamoorthy *et al.*, 1998; Challenger, 1998; Scott-Morales *et al.*, 2008; Sarukhán *et al.*, 2009).

Métodos. La determinación de la diversidad de especies y sus patrones de variación espacial y temporal es un componente básico de la información que se requiere en los sitios de investigación ecológica a largo plazo. Con objeto de evaluar a la diversidad biológica de plantas, vertebrados y algunos grupos de invertebrados, se requiere contar con inventarios actualizados (listados de especies) e indicadores de diversidad, y el establecimiento de parcelas, transectos o estaciones de muestreo para su monitoreo a largo plazo, cubriendo preferentemente la variación estacional anual, así como la variación a través de gradientes espaciales. Para poder

contar con información útil para comparaciones dentro y entre diferentes tipos de ecosistemas, es conveniente la estandarización de métodos y el uso de técnicas, unidades de muestreo y tamaños de muestra adecuados para el estudio de diferentes grupos taxonómicos y ecosistemas, a diferentes escalas espaciales y temporales. Es deseable también el desarrollo de estudios experimentales de largo plazo sobre la relación entre la diversidad y los patrones, procesos, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (unidad funcional) y paisajes (unidad espacial).

Dada la variedad de ecosistemas y condiciones ambientales de los diferentes sitios de estudio, y la misma diversidad de preguntas de investigación sobre este tema, no es posible en el espacio de este documento cubrir todos los aspectos. A continuación se señalan, a manera de ejemplos, algunas técnicas para los estudios de largo plazo relacionados con el tema del papel de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas. Algunas referencias importantes sobre los conceptos, métodos e indicadores para el estudio de la biodiversidad se encuentran en los trabajos de Soberón y Llorente (1993), Magurran (2004), Halffter *et al.* (2001, 2005), Moreno (2001), Southwood y Henderson (2001), Stohlgren (1995, 2007), Shachak *et al.* (2005) y Schneider (2009).

Diversidad florística y vegetación. En el estudio de los ecosistemas terrestres o de la interfase de éstos con los ecosistemas acuáticos (humedales y hábitats ribereños o costeros), la caracterización de la riqueza y composición de especies y los atributos estructurales de la vegetación constituyen el punto de partida para otros estudios ecológicos. Esto sirve también para la caracterización de hábitat, como contexto para los estudios de diversidad de la fauna, y como información básica para los estudios de productividad primaria, dinámica del agua, carbono y nutrientes, regímenes de perturbación y análisis de la interfase ecosistemas naturales y transformados o manejados.

Los inventarios de especies de plantas vasculares pueden ser diseñados de tal manera que proporcionen información sobre patrones de variación espacial y temporal, utilizando transectos o puntos fijos de muestreo distribuidos

a través de gradientes ambientales, así como parcelas permanentes. La caracterización de la vegetación debe considerar sus atributos fisonómicos (formas de vida presentes, altura de los componentes dominantes, estratificación y fenología de la producción y caída de hojas, entre otros), composición (especies presentes o asociadas, abundancia, frecuencia, dominancia y valor de importancia), y estructura (estratificación vertical, distribución horizontal, área basal, y distribución de diámetros y alturas; en algunos casos, como en los bosques de coníferas, es posible determinar la estructura de edades del estrato arbóreo).

Las distintas unidades de vegetación pueden ser determinadas y comparadas lo más objetivamente posible a través de una aplicación sistemática de indicadores estructurales y fitosociológicos, y analizadas por métodos de clasificación y ordenación (Greig-Smith, 1983; Kent y Coker, 1992; Jongman *et al.*, 1995). Los tipos de vegetación y los sitios de estudio pueden compararse utilizando medidas de similitud e índices de diversidad y uniformidad (Magurran, 2004). Los cambios en los atributos de la vegetación (composición, estructura, fenología) y las poblaciones de plantas (producción y establecimiento del renuevo, incorporación al estrato arbóreo, mortalidad, crecimiento en diámetro y altura) se estudian a largo plazo a través de parcelas permanentes (Alder y Synnott, 1992; Stohlgren, 2007). Las unidades de muestreo varían en forma y tamaño, dependiendo del tipo de vegetación y el tamaño de los organismos. Por ejemplo en ecosistemas forestales se utilizan comúnmente parcelas circulares o cuadrangulares, de 0.01 a 0.1 ha o mayores (de varias hectáreas), y en comunidades herbáceas se utilizan líneas de interceptación (Kent y Coker, 1992). En Dallmeir y Comiskey (1998) se presentan ejemplos de estudios a largo plazo sobre el monitoreo y modelación de la biodiversidad en bosques alrededor del mundo. Una revisión actualizada de los métodos para medir la diversidad de plantas se encuentra en Stohlgren (2007).

Fauna. Como en el caso de la flora, es importante contar con inventarios y listados de especies, al menos de los grupos que se consideran más relevantes para caracterizar su diversidad,

como vertebrados terrestres, aves, algunos grupos de insectos como mariposas o escarabajos y, en el medio acuático, además de los grupos ya señalados, el zooplancton, organismos bentónicos y peces. La diversidad de las comunidades de fauna y el estado y comportamiento de sus poblaciones se estudia a través de distintas técnicas que implican la observación directa de los animales o de sus huellas (Aranda, 1981), su captura (con trampas, redes y otros dispositivos) o por medio de la observación de indicios como huellas o excretas (Bookhout, 1994). Pueden utilizarse también otras técnicas como el uso de cámaras fotográficas automáticas (Carthew y Slater, 1991; Karanth y Nichols, 1998) o de grabación de sonidos que permiten el monitoreo de la presencia y distribución de especies animales (Ahlén, 1981).

Los mamíferos pequeños son utilizados con frecuencia como indicadores en ecosistemas terrestres, ya que son organismos numerosos, con una gran relevancia en la estructura y función de los ecosistemas, y además son relativamente fáciles de capturar. Para estudiarlos se utilizan trampas Sherman, distribuidas en sitios fijos en forma de malla, y los organismos capturados son identificados, descritos, medidos y pesados, y se marcan para su posterior identificación en el campo o para estimar parámetros poblacionales por técnicas de captura-marcaje-recaptura. Las técnicas de muestreo están descritas ampliamente en trabajos como los de Wilson *et al.* (1996) y en Southwood y Henderson (2000). Los reptiles y anfibios son otro grupo de especies relativamente abundante que puede estudiarse a través de su búsqueda, captura u observación directa en el campo, y se utilizan trampas de embudo o caída y cercas de lámina (*drift fences*). Las técnicas de muestreo y diseño de los transectos están ampliamente discutidos en Campbell y Christman (1982) y Heyer *et al.* (1994).

En el caso de las aves se establecen transectos para llevar a cabo "conteos por puntos" (Ralph *et al.*, 1996), con el fin de obtener información acerca de la riqueza, composición y abundancias de las especies y poblaciones. Cada punto se debe localizar como mínimo a 250 m de distancia del anterior, registrándose las especies detectadas visual y auditivamente en un radio fijo de

25 m por periodos de 10 minutos (Hutto, 1986). El conteo por puntos requiere de observadores capacitados en el reconocimiento visual y auditivo de las aves. Otras técnicas comúnmente utilizadas implican la captura de aves con redes de niebla, que tienen ciertas ventajas para observar el estado de los organismos (tamaño, peso, estado de desarrollo, sexo, condición reproductiva), marcar individuos y obtener datos acerca de sus desplazamientos (especialmente importante en el caso de especies migratorias), además de que este método facilita la identificación de las especies (Santana, 2000). Las redes de niebla son utilizadas también en el caso de los murciélagos.

Para los diferentes grupos de insectos se utilizan trampas de luz o con cebos atrayentes, redes y mangas de golpeo, aspiradores, y en el caso de las mariposas diurnas puede utilizarse la observación directa. Para los peces y otros organismos acuáticos se utilizan muestreos con redes fijas o de arrastre y otros dispositivos de pesca, con técnicas cuantitativas de captura por unidad de esfuerzo. Las comunidades de animales sésiles (por ejemplo organismos bentónicos) pueden muestrearse con unidades de muestreo de dimensiones fijas o transectos con líneas de interceptación, de manera similar al estudio de la vegetación. La composición de las comunidades de fauna y su variación espacial y temporal es descrita y comparada utilizando también índices de diversidad, medidas de similitud, y técnicas numéricas de clasificación y ordenación (Bookhout, 1994; Jongman *et al.*, 1995).

Estudios de observación de largo plazo de patrones y procesos. Más allá de los aspectos descriptivos, que son básicos y sirven de punto de partida para el estudio del papel de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas, se requiere del entendimiento de procesos y de la explicación de mecanismos. Los cambios en la composición y estructura de las comunidades de plantas y animales pueden ser estudiados comparando a diferentes escalas espaciales y temporales sitios de referencia no perturbados con sitios sujetos al efecto de perturbaciones (como incendios, deslizamientos de suelo, claros abiertos por eventos climáticos extremos, etc.) o a intervenciones de manejo (tratamientos silvícolas de corta o quemas prescritas, pesca, caza, des-

montes, pastoreo). Es importante hacer el seguimiento de poblaciones de especies que pueden funcionar como indicadoras, en cuanto a cambios en la estructura de edades, éxito reproductivo, regeneración y crecimiento, supervivencia y mortalidad, movimientos migratorios, etcétera.

Estudios experimentales. Además del monitoreo de la diversidad de los organismos, se recomienda también estudiar la influencia de factores ambientales y el papel de la diversidad en los procesos de los ecosistemas a través de la manipulación experimental. En el caso del papel de la diversidad de plantas herbáceas en el funcionamiento del ecosistema (efectos de la riqueza de especies sobre la productividad primaria y los nutrientes del suelo, resistencia a cambios en las condiciones del clima o la concentración de CO₂ en la atmósfera) pueden citarse como ejemplos los estudios de Tilman (1999), Héctor *et al.* (1999), Tilman *et al.* (2001) y Reich *et al.* (2001). A mayor escala se han estudiado los efectos de la manipulación de la vegetación y la composición de especies en la dinámica del agua y nutrientes en microcuencas experimentales (Douglas & Swank, 1975; Borman & Likens, 1979; Swank & Crossley, 1988; Schlesinger, 1997; Likens, 1989; Likens & Borman, 1989; Timan, 1989; Mass *et al.*, 2002).

Infraestructura. Para llevar a cabo los estudios sobre biodiversidad, se requiere de condiciones adecuadas para establecer y conservar a largo plazo parcelas y transectos permanentes, preferentemente en estaciones de investigación de campo protegidas. Los sitios deben estar localizados adecuadamente (en mapas, con indicaciones de acceso documentadas, y debidamente señalados) para poder ser reubicados, incluso por investigadores diferentes y varios años después de su establecimiento. En muchos casos (por ejemplo en los sitios permanentes para estudios de vegetación), los organismos deben estar etiquetados. Para los muestreos de fauna se requieren trampas y otros dispositivos de captura, materiales para los sistemas de muestreo, binoculares, telescopios, sistemas de posicionamiento global (GPS) y manuales de identificación de las especies. Es imperativo que los sitios seleccionados para establecer las parcelas y tran-

sectos de muestreo puedan permanecer sin alteraciones significativas a largo plazo.

En cuanto a la infraestructura de laboratorio, es necesario que se cuente con facilidades para procesar ejemplares colectados, así como para almacenar y conservar a largo plazo ejemplares de referencia, que permitan verificar su correcta identificación taxonómica. El establecimiento y mantenimiento de herbarios, colecciones zoológicas y bases de datos sistematizados, es imprescindible.

4.2.4. Regímenes de perturbación

Marco teórico. Debido al creciente impacto humano sobre el ambiente, el estudio de los efectos de perturbaciones antropogénicas en los ecosistemas (desde desmontes agrícolas, incendios e intervenciones de corta en bosques, el apacentamiento de ganado en pastizales, o la pesca en ecosistemas acuáticos, hasta la modificación del flujo del agua por las obras hidráulicas, la expansión urbana o la contaminación del aire, el agua y los suelos) ha cobrado gran relevancia (McDonnell & Pickett, 1993; Foster *et al.*, 2003; Calderón *et al.*, 2008). Un tema fundamental de estudio, desde las perspectivas de la gestión ambiental, el manejo de ecosistemas y la conservación biológica, es entender las respuestas de los procesos ecosistémicos a las perturbaciones, tanto aquellas que han sido causadas por las actividades humanas como las que son ocasionadas por fenómenos naturales y que han formado parte de la dinámica y variación histórica de los ecosistemas.

La divulgación de los conceptos derivados de muchos de los primeros estudios ecológicos ha propagado el supuesto simplificado de que los ecosistemas están en equilibrio con las condiciones ambientales y que son sistemas cuya dinámica está determinada y controlada por procesos internos, considerando que las perturbaciones son eventos raros o incluso extraños (Chapin *et al.*, 2002). La idea del *equilibrio ecológico* o el *balance de la naturaleza*, central en lo que se ha llamado “el paradigma clásico” de la ecología, está aún fuertemente arraigada no sólo en la visión popular del tema sino incluso en las ideas de algunos científicos y en la práctica de

la conservación de la naturaleza y el manejo de los recursos naturales, aunque la teoría ecológica actual plantea una perspectiva diferente de cambio dinámico y “flujo de la naturaleza” (Pickett & Ostfeld, 1995). Incluso en el marco legal y en muchos de los instrumentos de la gestión ambiental, predomina esta idea del equilibrio ecológico (lo cual es evidente en el nombre de la ley ambiental mexicana), que además es la base del enfoque de comando-y-control que ha predominado en el manejo de los recursos naturales (Holling & Meffe, 1996).

La investigación ecológica —especialmente a partir de la década de 1980— ha demostrado que los ecosistemas son abiertos, heterogéneos, dinámicos y cambiantes, que pueden estar en estados transitorios alejados o cercanos al equilibrio, y que están sujetos a eventos de perturbación (cambio abrupto), los cuales son un componente de su dinámica y no un factor raro o extraño a ésta. Las perturbaciones, como cambio en el estado o trayectoria dinámica de los ecosistemas, constituyen el motor de procesos como la sucesión tanto en sistemas terrestres como acuáticos y sus interfases (Holling, 1973, 1986; Sousa, 1984; Pickett & White, 1985; Botkin, 1990; De Leo & Levin, 1997; Pickett *et al.*, 1997; Terradas, 2001; Chapin *et al.*, 2002; Rohde, 2005). La evidencia científica muestra que la diversidad biológica es resultado de procesos evolutivos en los que los agentes y eventos de perturbación han actuado como fuerzas selectivas y como parte de los procesos ecológicos que producen y mantienen patrones de variación espacial y temporal en la diversidad de ecosistemas, especies y poblaciones (Levins & Paine, 1974; Connell, 1979; Smith *et al.*, 1997; Brawn *et al.*, 2001).

En el estudio de las perturbaciones y su papel en la dinámica de los ecosistemas, es importante poner en claro cuatro conceptos clave, que son el concepto mismo de perturbación, el evento que da lugar a ésta, el o los agentes causales de los eventos y el régimen dinámico al cual ha estado sujeto históricamente un ecosistema. Estos conceptos se describen a continuación:

a) *Perturbación* es un cambio en el estado y la conducta o trayectoria de un ecosistema causado por un evento que ocurre de ma-

nera relativamente discreta en el tiempo. El concepto se refiere al cambio observado en las variables de estado del ecosistema, sin necesariamente hacer referencia a un criterio de “normalidad”. El estado, conducta o trayectoria debe ser definido explícitamente (White & Pickett, 1985); distintas variables de estado pueden ser utilizadas para esto, como por ejemplo la biomasa, el carbono y los nutrientes almacenados en los compartimientos del ecosistema (Bormann & Likens, 1979), la composición de especies, la distribución de tamaños de los componentes bióticos y la cobertura (Oliver & Larson, 1990; Jardel *et al.*, 2009) entre otras.

b) *Evento de perturbación* o *disturbio* es el suceso puntual que desencadena la perturbación; se trata de un evento cualquiera, relativamente discreto en el tiempo, que modifica la estructura, el ambiente físico o la disponibilidad de sustrato o recursos de un ecosistema, comunidad o población (White & Pickett, 1985).¹⁰ Ejemplos de estos eventos son el consumo de biomasa en un incendio forestal o la formación de claros por la muerte o caída de árboles en un bosque, la muerte de organismos bentónicos en un

10. En la literatura en inglés se usa más frecuentemente el término *disturbio* —*disturbance*— para referirse a estos eventos, siguiendo el planteamiento de White y Pickett (1985), que hacen la diferencia entre los términos “perturbación” y “disturbio”; para ellos una *perturbación* es “un cambio explícitamente definido de un estado, conducta o trayectoria, también definido explícitamente”, de un sistema, y cuestionan el uso del término *perturbación* con el sentido negativo de cambio en las condiciones “normales” del estado o dinámica del sistema. Sugerimos usar el término *perturbación* (cambio de estado) de manera diferenciada respecto a cambios negativos (que deben definirse explícitamente con base en criterios ecológicos, sociales o económicos; Jardel, 2008) que pueden designarse como “degradación” o “alteración”. El uso del término *disturbio* se ha generalizado, pero como en español *disturbio* es sinónimo de *perturbación* (igual que en inglés) y tiene la connotación de alteración del orden social, el término *perturbación* ha sido utilizado más frecuentemente como equivalente del inglés *disturbance* en la literatura ecológica en nuestro idioma (Terradas, 2001), en el sentido en que lo usan White y Pickett (1985). Calderón *et al.* (2008), de acuerdo con White y Pickett (1985) han sugerido utilizar “*perturbación*” como cambio de estado, conducta o trayectoria del ecosistema y “*disturbio*” como el agente causal, que puede ser o no parte de la dinámica natural o histórica de los ecosistemas. Aquí hacemos la diferencia entre el agente (la causa) y el evento (*disturbio*).

arrecife durante una marejada, o la descarga de agua y el arrastre de sedimentos en un río durante una inundación.

- c) *Agente de perturbación* es el factor que constituye la causa material o inmediata del evento de perturbación. Por ejemplo el fuego provocado por rayos o las quemadas agrícolas que desencadenan un incendio forestal, la sequía, el huracán o los insectos parásitos que causan la mortalidad de árboles, la marejada o la descarga de contaminantes que afectan a los organismos del arrecife, o las lluvias torrenciales que causan la inundación. Los agentes pueden ser *físicos* (fenómenos meteorológicos como huracanes, vendavales, tormentas eléctricas y rayos, inundaciones, heladas o sequías, y fenómenos geológicos como deslizamientos de suelo o erupciones volcánicas), *biológicos* (brotes de parásitos o patógenos, impacto de grandes herbívoros) o *antropogénicos* (quemadas, desmontes, tala, descargas de contaminantes, etc.) y pueden actuar sinérgicamente.
- d) *Régimen de perturbación* es la amplitud de la variación histórica en los atributos de los disturbios o eventos de perturbación que influyen en la dinámica de los ecosistemas en el espacio y el tiempo (Swanson *et al.*, 1994). Los regímenes de perturbación se caracterizan por los siguientes atributos: el *tipo de agente* o agentes causales, la *frecuencia* de los eventos (probabilidad de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo, intervalo de retorno entre eventos sucesivos y periodo de rotación de los eventos en un área determinada), la *estacionalidad* (el periodo o estación del año en que ocurren con mayor probabilidad los eventos), el *tamaño* y el *patrón espacial* del área afectada por el evento, la *magnitud* de los eventos (que se divide en la *intensidad* o fuerza física del evento y la *severidad* o impacto del evento sobre las propiedades del sistema de interés), y la *sinergia* entre distintos agentes de perturbación. Para el caso de un agente de perturbación determinado (el fuego, por ejemplo; véase Agee, 1993; Jardel *et al.*, 2009; Manson *et al.*, 2009), el régimen de perturbación puede caracterizarse de manera sintetizada por atributos como el

intervalo de retorno de los eventos, su estacionalidad, intensidad, severidad y tamaño. Los regímenes de perturbación pueden ser considerados como naturales (por ejemplo en el caso de selvas tropicales húmedas en zonas costeras e islas donde es importante la influencia de huracanes), pero en el caso de otros eventos como los incendios forestales donde se mezclan causas naturales (caída de rayos) y humanas (quemadas deliberadas o accidentales) se prefiere hablar de *regímenes históricos* (Agee, 1993; Swanson *et al.*, 1994). Un *régimen de perturbación alterado* es aquel en el que sus atributos presentan una desviación respecto a la amplitud de su variación histórica; puede hablarse de *regímenes manejados* cuando hay intervenciones para regular la frecuencia, intensidad, severidad, tamaño, etc. de una perturbación con ciertos objetivos (por ejemplo, las intervenciones de corta en la silvicultura, las quemadas en el manejo de pastizales o la regulación del flujo hidrológico en un río).

Los eventos de perturbación pueden ser vistos como parte de procesos que modifican los patrones espaciales y temporales de composición de especies (presencia o ausencia, abundancia relativa, riqueza) y estructura (distribución espacial de la biomasa y los organismos, tanto vertical como horizontal, diversidad y uniformidad, redes tróficas, estructura de edades y tamaños de las poblaciones), y las tasas de flujo de energía y reciclaje de nutrientes, reiniciando los procesos de regeneración y sucesión (Levin *et al.*, 1974; Borman & Likens, 1979; Sousa, 1994; White & Pickett, 1985; Oliver & Larson, 1990; Chapin *et al.*, 2002; Manson *et al.*, 2009).

Los ecosistemas han estado sujetos a regímenes de perturbación, dentro de un cierto rango o amplitud de variación histórica (Swanson *et al.*, 1994; Lugo, 2000; Lugo *et al.*, 2000; Turner *et al.*, 2003; Ostertag *et al.*, 2005; Day *et al.*, 2007), que son determinantes de su composición, estructura y funcionamiento. Las causas de las perturbaciones pueden ser naturales —como es el caso de huracanes, sequías, incendios forestales provocados por rayos, deslizamientos de suelo, o marejadas, por citar algunos ejem-

plos— o humanas —incendios antropogénicos, intervenciones de manejo, impactos de actividades agrícolas, industriales, urbanas, etcétera—. En cuanto a las perturbaciones antropogénicas es importante diferenciar entre aquellas que han formado parte de la dinámica de ciertos ecosistemas (como los incendios, el apacentamiento de ganado o la agricultura de tumba-roza-quema en algunos tipos de praderas y bosques) a través de cientos o miles de años, y aquellas que representan nuevos tipos de perturbaciones causadas por actividades humanas a partir de la era industrial, y que generalmente están asociadas a procesos de deterioro ambiental (Ellis & Ramanakutty, 2008).

La caracterización de los regímenes de perturbación y de las respuestas de los ecosistemas a éstos, es un tema de estudio relevante de la ecología, que requiere una estrategia de investigación a largo plazo, ya que estos fenómenos se manifiestan en escalas espaciales extensas y a través de largos periodos de tiempo. La investigación ecológica a largo plazo ha permitido, por ejemplo, entender el papel ecológico de disturbios que provocan perturbaciones grandes y que ocurren con poca frecuencia (huracanes, erupciones volcánicas, incendios catastróficos) pero que tienen una importante influencia en la estructura, composición y dinámica de los ecosistemas (Magnuson, 1990; Turner *et al.*, 1997).

Diversos agentes de perturbación influyen en la dinámica de los ecosistemas. Entre estos factores, algunos de los más relevantes en el caso de los ecosistemas terrestres estudiados por los grupos que actualmente forman la Red MEX-LTER se presentan en el cuadro 2 (véase también Calderón *et al.*, 2008).

El entendimiento del papel ecológico de las perturbaciones y su influencia en la estructura y dinámica del mosaico de parches en el paisaje, es particularmente importante para la conservación de la biodiversidad (Pickett & White, 1985; Christensen, 1997; Christensen *et al.*, 1996). La conservación involucra necesariamente una paradoja, ya que se busca preservar sistemas que, de entrada, son dinámicos y cambiantes (White & Bratton, 1980; Botkin, 1990; Ostfeld *et al.*, 1997). Es importante entonces reconocer la importancia de los procesos que regulan el funcio-

namiento de los ecosistemas y, en lugar de intentar restringir la variación natural que generan, usar nuestro entendimiento de ellos para minimizar o controlar ciertos efectos ambientales “indeseables”.

Varios estudios han demostrado que la supresión de perturbaciones que han formado parte de un ecosistema genera consecuencias negativas. La modificación de los ciclos naturales de inundación y sequía en ríos y humedales ha llevado a la desaparición de hábitats y especies (son especialmente sensibles a esto los organismos de humedales y llanuras de inundación), a la modificación de los cauces y a su desbordamiento cuando ocurren precipitaciones y escurrimientos extremos (Brawn *et al.*, 2001; Reice, 2001); o bien, en ecosistemas forestales con un régimen histórico de incendios frecuentes de baja severidad, la supresión del fuego conduce a la acumulación de combustibles y a incendios de alta severidad, destructivos e incontrolables (Agee, 2002; Myers, 2006), por lo cual es más recomendable restaurar el régimen de fuego utilizando quemas prescritas (Agee & Skinner, 2005). Las estrategias de manejo de ecosistemas que trabajan en contra de las perturbaciones que los regulan, generalmente los transforman a formas más simplificadas (menos diversidad estructural y de especies), aumentando su vulnerabilidad y disminuyendo su resiliencia frente a nuevas perturbaciones (De Leo & Levin, 1997; Folke *et al.*, 2004).¹¹

En el caso de México, el territorio del país y sus áreas costeras y oceánicas están sujetos a una gran variedad de factores de perturbación natural, que incluyen ciclones y tormentas tropicales,

11. Muchos de los problemas causados por intervenciones de manejo en los ecosistemas se deben a la aplicación de prácticas que restringen o reducen su variación natural o histórica, alterando su dinámica y disminuyendo su resiliencia (su capacidad para absorber el efecto de perturbaciones y persistir dentro de un régimen dinámico: Holling, 1996; Gunderson *et al.*, 2010) basándose en una lógica de comando-y-control. Ejemplos de esto son la declinación de pesquerías o de bosques manejados bajo el concepto de máximo rendimiento sostenible, o el aumento del peligro de incendios severos y destructivos provocado por la supresión del fuego en bosques con regímenes de incendios frecuentes de baja severidad, o los impactos del control del flujo hidrológico con obras hidráulicas; Holling y Meffe (1996) se han referido a esto como “la patología en el manejo de los recursos naturales”.

Cuadro 2

Ejemplos de algunos agentes de perturbación característicos de ecosistemas terrestres y costeros representados en diferentes sitios de estudio de la Red MEX-LTER

Agente de perturbación	Ecosistema*	Localidad
Caída o muerte en pie de árboles individuales o grupos de árboles	SAP, SMS, BMM, MAN	Los Tuxtlas, Sierra de Manantlán, Chamela, Celestún
Huracanes y viento	SAP, BMM, BPO, SBC, MAN	Los Tuxtlas, Sierra de Manantlán, Chamela, Laguna de Términos, Costa de Jalisco-Colima, Celestún, La Mancha
Deslizamientos de suelo	BPO, BMM, SBC, MXE	Los Tuxtlas, Sierra de Manantlán, Chamela, Mapimí
Sequías	SAP, BMM, SBC, MXE, PAZ, HUM	Los Tuxtlas, Sierra de Manantlán, Chamela, Mapimí, La Campana, Vaquerías, El Tokio, Celestún
Plagas de insectos y enfermedades forestales	BPO, BQU, BOY	Sierra de Manantlán
Inundaciones y cambios en el flujo hidrológico	BGA, MAN, HUM	Río Ayuquila (Sierra de Manantlán), Laguna de Términos, Costa de Jalisco-Colima, Celestún, La Mancha
Incendios forestales	BPO, BOY, PAZ	Sierra de Manantlán, La Campana, Vaquerías.

* BGA, bosque de galería; BMM, bosque mesófilo de montaña; BPO, bosque de pino-encino; BOY, bosque de oyamel; MAN, manglar; MXE, matorral xerófito; PAZ, pastizal; SAP, selva alta perennifolia; SBC selva baja caducifolia; SMS, selva mediana subcaducifolia; HUM, humedales.

inundaciones, sequías, heladas y nevadas (en las zonas de montaña), tsunamis, erupciones volcánicas y sismos, deslizamientos de suelo e incendios forestales (Bitrán, 2001; Manson *et al.*, 2009).

Las perturbaciones naturales tienen importante efectos sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas y se considera que el cambio climático está generando alteraciones en los regímenes de perturbación naturales o históricos, aumentando su frecuencia y magnitud (Dale *et al.*, 2001; Landsea *et al.*, 1998; Goldenberg *et al.*, 2001; Hasselmann *et al.*, 2003; Hasselmann *et al.*, 2004; King, 2004, 2005; Schnur & Hasselmann, 2005; Shein *et al.*, 2006; Manson *et al.*, 2009). La investigación ecológica a largo plazo es, en este sentido, una importante herramienta para evaluar y entender el régimen dinámico y la variación natural o histórica de los ecosistemas y diferenciarlos de factores y procesos de degradación o alteración antropogénicos, que cada vez están más ampliamente extendidos debido a la expansión de las actividades humanas y su impacto a escala de la biosfera (McDonnell & Pickett,

1993; McNeill, 2000; Foster *et al.*, 2003; Ellis & Ramankutty, 2008; Day *et al.*, 2007).

Dado que la alteración humana de los ecosistemas se ha propagado prácticamente a todos los rincones del planeta (Mooney & Godron, 1983; Vitousek *et al.*, 1997; McDonnell & Pickett, 1993), el entendimiento de la influencia de las perturbaciones antropogénicas es fundamental para comprender los patrones y procesos ecológicos, incluso en áreas consideradas “silvestres” o “prístinas”. Aunque el estudio del impacto humano en la naturaleza y la historia de las relaciones entre las sociedades humanas y su ambiente ha formado parte de la geografía por casi dos siglos (Cortez, 1991) y las referencias sobre el tema tienen viejos antecedentes históricos (Marsh, 1864; Leopold, 1920; Urteaga, 1987), el análisis de procesos históricos y el estudio del papel ecológico de la influencia humana han tardado más en desarrollarse dentro de la ecología (McDonnell & Pickett, 1993). En esta ciencia ha predominado un fuerte sesgo por parte de los ecólogos debido al paradigma clásico del “balan-

ce de la naturaleza” (Botkin, 1990), con lo cual los estudios ecológicos se han enfocado al entendimiento de cómo los ecosistemas están estructurados y funcionan en áreas supuestamente libres de alteración humana (McDonnell & Pickett, 1993; Foster *et al.*, 2003). Incluso en una amplia variedad de trabajos ecológicos se pasa por alto que los sitios de estudio, incluyendo algunas de las más importantes estaciones biológicas de campo, están localizados en lugares que alguna vez fueron severamente perturbados (Cairns, 1988). La intervención humana crea condiciones de estructura, composición y funcionamiento de la vegetación y del paisaje, que pueden conducir a los ecólogos a interpretaciones erróneas de sus resultados de investigación, si prescinden de la consideración del factor humano (McDonnell & Pickett, 1993; Foster, 2000; Foster *et al.*, 2003). Hace ya tiempo que se ha señalado que el conocimiento de la arqueología y la historia local deberían formar parte del bagaje de la investigación ecológica (Day, 1953). En el caso de pesquerías, Pitcher (2001) ha sugerido la incorporación tanto del conocimiento ecológico, entendido como el generado por la investigación actual, como el tradicional, referido a los primeros pobladores, aun en el caso de que ya se hayan extinguido. El conocimiento tradicional de indígenas y campesinos representa una valiosa fuente de información sobre el patrimonio natural y los ecosistemas naturales y manejados (Jardel & Benz, 1997; Toledo *et al.*, 2003).

La consideración del factor humano en ecología ha ido cobrando cada vez más interés, como resultado de las consecuencias evidentes del incremento de las perturbaciones antropogénicas en los ecosistemas, así como por una mayor integración entre la ecología y las disciplinas aplicadas de manejo de recursos naturales. También ha sido fundamental la transformación de la noción del balance de la naturaleza con la evidencia generada en estudios sobre el cambio de la estructura y composición de las comunidades bióticas a través del tiempo (Delcourt, 1987; Bormann & Likens, 1979; Koop, 1989; Foster *et al.*, 1990; Glenn-Lewin & van der Maarel, 1992; Foster, 1993, 2000; Ellis & Ramankutty, 2008) y el surgimiento de nuevos paradigmas en ecología (Botkin, 1990), que reconocen el papel de las

perturbaciones naturales y antropogénicas en la dinámica histórica de los ecosistemas (White, 1979; Sousa, 1984; Pickett & White, 1985; McDonnell & Pickett, 1993; Foster *et al.*, 2003).

Actualmente los ecosistemas son entendidos como sistemas complejos, abiertos, autocatalíticos, con una dinámica no lineal, que pueden presentar diferentes estados transitorios o estables (Holling, 1986); este enfoque enfatiza su apertura y contingencia histórica (McDonnell & Pickett, 1993), así como la importancia de su interrelación con los sistemas sociales (Gallopín *et al.*, 1989; Naveh & Lieberman, 1990; Costanza *et al.*, 1993). Esta concepción de los ecosistemas contrasta con la noción de sistemas naturales en equilibrio, libres de la influencia humana, que aún predomina como resultado de las ideas propuestas en las décadas de 1960 y 1970, mismas en las que se basan leyes y programas ambientales aún vigentes (por ejemplo, la Ley del *Equilibrio Ecológico* y Protección al Ambiente en México), y muchos de los programas de manejo de recursos naturales y de conservación de áreas protegidas.

La importancia ecológica del factor humano ha sido puesta en evidencia por un creciente número de estudios que han demostrado que existen múltiples formas de impacto (McDonnell & Pickett, 1993), y que la larga historia de presencia humana en varias latitudes ha dejado pocas áreas, si es que alguna, en una condición totalmente natural (Turner & Meyer, 1993; Ellis & Ramankutty, 2008). Por ejemplo, mitos como el de una naturaleza prístina y un escaso impacto antropogénico en la América precolombina han sido cuestionados (Day, 1953; Budowsky, 1959; Denevan, 1992; Ezcurra, 1992; O'Hara *et al.*, 1993; Mann, 2005; Heckenberger *et al.*, 2003). Incluso en áreas que percibimos como naturales o silvestres existen evidencias de la influencia humana, que no ha sido necesariamente negativa, y un componente importante de la biodiversidad está asociado con áreas que tienen una larga historia de manejo por parte de campesinos e indígenas (Foster, 2000; Foster *et al.*, 2003; Toledo *et al.*, 2003; Boege, 2009).

Varios de los cambios que ocurren en los ecosistemas por causas antropogénicas pueden ser irreversibles o persistentes por periodos pro-

longados (Foster *et al.*, 2003). Algunos de estos cambios pueden percibirse como positivos, ya que favorecen a especies utilizadas como recursos, o crean condiciones favorables para los seres humanos. Sin embargo, en otros casos, los cambios inducidos por causas humanas directas o indirectas pueden afectar la calidad ambiental así como las opciones futuras de manejo.

La mayor parte de los sitios de la Red MEX-LTER han tenido, en algún momento de su historia, presencia humana o están sujetos actualmente a perturbaciones antropogénicas en su entorno (véase por ejemplo Maass, 1995; García-Oliva & Maass, 1998; Jardel, 1998; Calderón *et al.*, 2008). Algunos de los factores de perturbación antropogénica incluyen incendios forestales, desmontes agropecuarios, pastoreo, explotación forestal, pesca, alteración del régimen hidrológico por las obras hidráulicas y la desviación de agua, y emisiones de contaminantes a la atmósfera, el agua y los suelos. Incluso algunos factores que popularmente se consideran positivos, como la supresión de incendios y el control de inundaciones, generan alteraciones de los regímenes de perturbación y del rango de variación natural de las condiciones de ecosistemas como bosques y pastizales en el caso de los incendios, y ríos y humedales en el caso de las inundaciones (Reice, 2001; McGuire, 2006; Petterson *et al.*, 2006; Day *et al.*, 2007; Liu, 2007; Rodiek, 2007).

Relevancia. Desde la perspectiva del manejo de ecosistemas y considerando que éste integra la producción, conservación y restauración (Jardel *et al.*, 2008), es fundamental entender la respuesta de los ecosistemas a las perturbaciones, así como detectar el cambio en el estado de los sistemas ecológicos a diferentes escalas, espaciales y temporales, por lo cual el enfoque de investigación ecológica a largo plazo y de observación continua (monitoreo) es esencial. De hecho, la mayor parte del conocimiento actual sobre el efecto de perturbaciones en la dinámica de los ecosistemas, se deriva del estudio de sitios de investigación ecológica de largo plazo (Turner *et al.*, 1998; Dale *et al.*, 2001; Symstad *et al.*, 2003; Foster *et al.*, 2003). Ejemplos de esto son los estudios en Hubbard Brook (Borman & Likens, 1979) o Harvard Forest (Foster, 1993), o en zonas costeras en la cuenca y delta del río

Mississippi (Mitsch & Day, 2004; Day *et al.*, 2005; Mitsch, 2005; Mitsch & Day, 2006).

Tanto en áreas silvestres protegidas como en bosques manejados para la producción, la definición de qué condiciones del paisaje y que procesos del ecosistema son naturales o antropogénicos, constituye un aspecto clave para la toma de decisiones de manejo con objetivos de conservación (Agee & Huff, 1985; Bratton *et al.*, 1980; Romme & Knight, 1981; Jardel *et al.*, 2004d). El desarrollo de la teoría ecológica (en este caso, el entendimiento del papel de las perturbaciones en el funcionamiento de los ecosistemas), así como el diseño de prácticas adecuadas de manejo y conservación, requieren de estudios de referencia que permitan la interpretación de la influencia de factores de perturbación. Generalmente, conceptos como “salud del ecosistema”, “integridad ecológica”, “equilibrio ecológico” e “impacto ambiental” son utilizados en la definición de políticas y prácticas de gestión, sin una base concreta y operativa en el entendimiento de procesos ecológicos (Allen & Hoekstra, 1994; De Leo & Levin, 1997). Así, los sitios de investigación ecológica a largo plazo son necesarios como áreas de referencia y experimentación sobre patrones y procesos ecológicos, cumpliendo una importante función al contribuir con el desarrollo de una base conceptual más sólida para la gestión del ambiente y los recursos naturales (Childers, 2006). Esto es particularmente útil en la planificación del manejo de áreas protegidas, proyectos de restauración y rehabilitación ecológica, evaluaciones de impacto ambiental y, en general, en todas aquellas cuestiones de manejo que requieren la identificación de patrones y procesos que son consecuencia de perturbaciones naturales o antropogénicas o una combinación de ambas.

El estudio de los antecedentes históricos del régimen de perturbaciones naturales y antropogénicas mediante estudios retrospectivos, así como el monitoreo de sus efectos en los sitios de estudio de la Red MEX-LTER, es también un componente básico de la estrategia de investigación. Los estudios ecológicos históricos o retrospectivos y el monitoreo de perturbaciones permiten interpretar las condiciones del pasado y del presente e interpretar tendencias de largo plazo de

los ecosistemas en los sitios de investigación. Así los estudios sobre patrones y frecuencia de perturbaciones requieren de una integración con las investigaciones en otras áreas temáticas propuestas (productividad primaria, dinámica del agua, carbono y nutrientes, biodiversidad, cambio climático e interacciones a nivel de interfase entre ecosistemas naturales o manejados), que forman la base del plan de investigación de la Red MEX-LTER.

Métodos y variables. La caracterización del régimen de perturbaciones y su monitoreo puede llevarse a cabo a diferentes escalas (paisaje, cuenca, parcela permanente), integrando estudios basados en el monitoreo de sitios establecidos en gradientes de perturbación (*i.e.* incluyendo sitios sin registro de eventos de perturbación y sitios perturbados con diferente magnitud y tiempo desde el último disturbio) y experimentos de largo plazo en los cuales se pueden emular eventos de perturbación. Los estudios retrospectivos (paleoecológicos y de ecología histórica) son un complemento fundamental para conocer el régimen de perturbaciones y su variación histórica en un área determinada.

El historial de perturbaciones como incendios, desmontes, tala, deslizamientos de suelo, sequías, huracanes y cambios en el nivel medio del mar, entre otros, puede ser reconstruido mediante métodos de ecología histórica (Foster, 2000; Egan & Howell, 2001; Frelich, 2002; Cahoon, 2006). Estos trabajos ofrecen información que sirve como contexto a los demás estudios ecológicos de largo plazo. Los métodos a utilizar incluyen:

a) Observación de cambios, a nivel de paisaje o cuenca, en la cobertura vegetal, el uso del suelo y la geomorfología con fotografía aérea e imágenes de satélite multifecha (Dirzo & García, 1992; Jardel *et al.*, 2004b).

b) Obtención de información histórica mediante entrevistas (historia oral) e investigación documental (revisión de archivos, estudios técnicos e informes de manejo, fotografías antiguas, relatos de viaje, trabajos científicos del pasado) (Egan & Howell, 2001). Incluso es importante la revisión de trabajos sobre la arqueología y la historia regional (Foster *et al.*, 2003).

c) Extracción de núcleos o cilindros de suelo o elaboración de perfiles para detectar capas de carbón, cenizas volcánicas o material aluvial o coluvial, que sirven como indicadores de eventos de perturbación como incendios, erupciones volcánicas, inundaciones, deslizamientos de suelo o tasas de sedimentación. En zonas con materiales sedimentarios (como lagos y humedales) es posible aplicar técnicas de palinología para reconstruir cambios en la composición florística relacionados con perturbaciones como huracanes e incendios forestales (Foster, 1993; Horn *et al.*, 2000; Figueroa-Rangel *et al.*, 2008, 2009), así como métodos de paleotempestología (Liu, 2004), la determinación de cambios en el nivel de la superficie de los sedimentos y el nivel freático en humedales (método de *surface elevation table-marker horizon*, SET-MA; Whelan *et al.*, 2007) y la evaluación de tendencias en la erosión y sedimentación en lagos, humedales y zonas costeras (Liu, 2004; Cahoon, 2006; Liu, 2007). Los estudios retrospectivos ayudan a inferir la composición de la vegetación en el pasado e incluso la sucesión después de perturbaciones como incendios (Green, 1982) utilizando la estratigrafía del polen y microfósiles (Davis, 1989).

d) En bosques con árboles que presentan anillos de crecimiento periódico es posible reconstruir la historia de rodales a través de métodos dendrocronológicos, que permiten fechar eventos de regeneración, incendios, ataques de insectos o tala (Trenard, 1982; Grissino-Mayer, 1995, 1999, 2005; Hesse *et al.*, 1998; Sweetnam *et al.*, 2001; Fulé *et al.*, 2009). Los métodos para la reconstrucción de la frecuencia histórica de incendios forestales y otras perturbaciones que puedan registrarse por métodos dendrocronológicos, registrando cicatrices y cambios en los patrones de crecimiento de los anillos en la madera, han sido descritos por Grissino-Mayer (1995, 1999, 2001).

Las técnicas para estudios de observación a largo plazo (monitoreo) incluyen:

a) Obtención periódica de fotografía aérea e imágenes de satélite para monitorear cambios en cobertura vegetal, el uso del suelo y la geomorfología.

- b) Establecimiento de parcelas permanentes para el estudio de la dinámica de rodales (establecimiento, crecimiento y mortalidad de plantas; reemplazo de especies, cambios en la estructura de tamaños o edades; véase Koop, 1989), cambios en la composición de la fauna, cambios en productividad primaria, materia orgánica, nutrientes y agua en el suelo, observación de la formación de claros, deslizamientos de suelo, o del efecto de diferentes tipos de perturbaciones.
- c) Establecimiento de parcelas permanentes en claros en los que se conoce el tiempo desde el último evento de perturbación y el tipo y magnitud del mismo, y seguimiento de cambios en composición y estructura de la vegetación y fauna.

El estudio de los efectos de perturbaciones puede también llevarse a cabo mediante experimentos; los ejemplos clásicos corresponden a los estudios de cuencas experimentales para el estudio de ecosistemas en Hubbard Brook y Coweetta (Bormann & Likens, 1979; Swank & Crossley, 1988):

- a) Establecimiento de experimentos en los que se simulan diferentes tipos y eventos de perturbación y sus consecuencias, a diferentes escalas y sobre distintos componentes del ecosistema (por ejemplo la cobertura vegetal, los suelos, el flujo hidrológico, la regeneración de plantas, el banco de semillas, la composición de especies, el éxito reproductivo de animales, etcétera).
- b) Dada la escala de muchos eventos de perturbación o las restricciones para realizar intervenciones experimentales en ciertos tipos de hábitat, es posible utilizar estudios comparativos entre sitios que han sufrido algún tipo de perturbación natural o antropogénica, con sitios no perturbados que sirven como control. El estudio a largo plazo de un área puede registrar eventos de perturbación poco frecuentes o episódicos, y los datos generados antes y después del evento sirven como un experimento “natural”.
- c) También pueden diseñarse experimentos aprovechando sitios donde hay interven-

ciones de manejo (por ejemplo actividades pesqueras, forestales, ganaderas, agrícolas), diseñando estas intervenciones como experimentos en los que se comparen distintos tratamientos que simulan perturbaciones naturales o antropogénicas (por ejemplo, distintas intensidades de pastoreo, de formación de claros por la extracción de árboles, o de fuego en quemadas prescritas).

4.2.5. Cambio climático

Marco teórico. El cambio climático es uno de los componentes más críticos del cambio ambiental global (Vitousek, 1992; Munsinghe y Swart, 2005; Hasselmann *et al.*, 2003, 2004; King, 2004, 2005; IPCC, 2007). Las tendencias en el aumento de la temperatura promedio a escala global en el último siglo, así como el aumento concomitante en la concentración atmosférica de diversos gases de invernadero como el bióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), han provocado inquietud sobre las implicaciones de un cambio climático tanto en los ecosistemas naturales como en los sistemas de producción agropecuaria, forestal y pesquera (Smil, 1997). Una evidencia del calentamiento reciente del planeta radica en que diez de los años más calientes de que se tiene registro han ocurrido en las últimas décadas a partir de los años ochenta (Jones, 1994; Dale *et al.*, 2001). Las temperaturas globales de superficie han aumentado aproximadamente 0.2°C por década en los pasados 30 años y son 0.8°C más altas que en el siglo pasado; el calentamiento es prácticamente ubicuo tanto sobre la tierra como en el océano, y se manifiesta en la reducción de los glaciares alpinos, un deshielo más temprano y el derretimiento de capas de hielo en los polos; el aumento de los gradientes de temperatura oeste-este en el océano Pacífico han incrementado la posibilidad de eventos más fuertes de El Niño, como los de 1983 y 1998; el año 2005 ha sido probablemente el más caliente del último millón de años (King, 2004).

Estas evidencias muestran que está ocurriendo un calentamiento del clima y diversos estudios indican que está asociado a las emisiones antropogénicas de gases con efecto de inverna-

dero (GEI); el cambio climático es un fenómeno que ya está presente y cuyas consecuencias estamos viviendo y no la proyección de un probable evento futuro (Hansen *et al.*, 2006; IPCC, 2007; Stern, 2007).

El aumento no sólo de la temperatura sino de la variación climática puede afectar procesos biológicos y ecológicos que controlan la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Por ejemplo, una mayor temperatura puede incrementar las tasas de respiración y las tasas de mineralización de nitrógeno (*i.e.* la transformación de N orgánico a inorgánico). Ambos procesos, sin embargo, tienen consecuencias contrastantes sobre el almacenamiento de carbono (Houghton *et al.*, 1998). El primero provoca una pérdida mientras que el segundo aumenta el almacén de carbono terrestre. El balance final depende de diversos factores tales como los cocientes C:N de la materia viva y del suelo, el destino final del N mineralizado, la capacidad de crecimiento de las plantas y la respuesta de los microorganismos del suelo (Houghton *et al.*, 1998). Aunque se ha postulado que el aumento en la temperatura provocará una captura de carbono en la biomasa de los bosques mayor que lo que se perderá a la atmósfera por la mineralización de la materia orgánica del suelo (Melillo *et al.*, 1993), existen cuestionamientos sobre los resultados obtenidos usando modelos de simulación (Houghton, *et al.*, 1998). Esto último debido a la incertidumbre en la parametrización de los modelos y la carencia de suficientes datos históricos para llevar a cabo la validación en diferentes escenarios.

La relación detectada entre los cambios de temperatura y la concentración de CO₂ atmosférico (Keeling *et al.*, 1995) ha puesto de manifiesto un interés marcado en el balance de carbono del planeta, lo que ha provocado un esfuerzo internacional en el ciclo global del carbono como punto focal de investigación (Houghton y Meira-Filho, 1995; IGBP, 1999; King, 2004; Lal, 2004). Las consecuencias del cambio climático no sólo implican variaciones globales en la temperatura sino también cambios regionales en los patrones de precipitación y, por consecuencia, en los procesos dependientes de la disponibilidad de agua, como la productividad primaria y la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Existe

aún incertidumbre con respecto a los cambios en precipitación a nivel global, aunque hay evidencia de que fenómenos como el ciclo El Niño-La Niña, los cuales afectan la lluvia a escala continental, ya están presentando anomalías (Hansen *et al.*, 2006). Más aún, las predicciones de los modelos climáticos sobre los cambios a nivel regional son todavía más variables (Liverman y O'Brien, 1991).

El cambio climático implica también alteraciones en los regímenes de perturbación (Dale *et al.*, 2001), como el incremento en la duración de las temporadas de incendios forestales y la incidencia y severidad de éstos (McKenzie *et al.*, 2004; Westerling *et al.*, 2006).

Otro efecto importante del cambio climático es el aumento del nivel del mar. El promedio de cambio del nivel del mar obtenido por medio de registros con mareógrafos en los últimos 50 años es de $+1.8 \pm 0.3$ mm año⁻¹. Otras mediciones registradas por sensores remotos (TOPEX/POSEIDON, JASON 1) es de $+3.1 \pm 0.4$ mm año⁻¹ desde 1993. Estos valores representan en promedio un incremento de 0.5 m por siglo en los escenarios más conservadores, que afectará a los ecosistemas y las poblaciones humanas de las zonas costeras y los sistemas insulares (IPCC, 2001; Nerem, 1997, 1999; Chambers *et al.*, 2000; Cazenave y Nerem, 2004; Pugh, 2004; Lombard *et al.*, 2005; Nerem *et al.*, 2006).

El cambio climático tiene importantes consecuencias sobre la biodiversidad y se suma a los factores causantes de la extinción de especies. Un ejemplo de esto es la amplia distribución de extinciones de anfibios causada probablemente como consecuencia de los efectos del calentamiento global (Pounds *et al.*, 2006). Las especies de plantas y animales pueden emigrar en respuesta al cambio climático, pero su desplazamiento puede ser bloqueado por las condiciones del paisaje transformado por las actividades humanas y barreras geográficas (Hansen *et al.*, 2006). Algunos estudios muestran tendencias de migración de tipos de vegetación hacia los polos (por ejemplo Chapin *et al.*, 2005), y un estudio de 1,700 especies encontró evidencias de migración hacia los polos relacionado con el movimiento de las isotermas (Parmesano y Yohe, 2003).

Relevancia. El cambio climático generado por la alteración antropogénica de la composición gaseosa de la atmósfera, debido a las emisiones de GEI, tiene consecuencias críticas sobre los patrones y procesos de los ecosistemas (Chapin *et al.*, 2002; Munasinghe y Swart, 2005; Hubber-Sannwald *et al.*, 2008) y serias implicaciones sociales y económicas (Stern, 2007). Aunque el tema del cambio climático antropogénico tiene viejos antecedentes¹² y ha estado presente en la agenda ambiental internacional por varios años, la preocupación sobre el impacto del cambio climático en los ecosistemas fue puesta de manifiesto nuevamente en la Convención sobre el Cambio Climático que se llevó a cabo en Kyoto, Japón, en 1997, y que entró en vigor en febrero de 2005. En ella se realizó el papel que desempeñan las emisiones de GEI y la necesidad de reducirlas. Para ello se establecieron reglas que permitieran establecer objetivos en cuanto a las emisiones y a la captura de carbono, particularmente con respecto a la participación de los países desarrollados en las emisiones (Munasinghe y Swart, 2005). El carbono tiene un lugar preponderante por su importancia en los procesos biológicos del planeta y su influencia en las propiedades físicas de la atmósfera terrestre, así como por los efectos del cambio de cobertura y uso del suelo, y los patrones de producción y consumo de las sociedades modernas, que afectan la emisión y la captura de carbono (Smil, 1997; Lal, 2004). En este contexto, la incidencia de incendios forestales y el uso del fuego como herramienta de transformación de los ecosistemas tiene un papel crítico en el cambio climático; su utilización provoca pérdidas y redistribución de carbono y nutrientes y puede reducir la productividad de los ecosistemas a mediano y largo plazo (Kauffman *et al.*, 1992). Por ejemplo, la transformación de los bosques tropicales a sabanas puede traer cambios en los regímenes naturales de fuego que aumenten las emisiones de

CO₂ a la atmósfera (Kauffman *et al.*, 1998), así como modificar el albedo por la modificación de la cobertura vegetal, con posibles repercusiones para el clima local, regional y global. El entendimiento del impacto del cambio climático en los ecosistemas rebasa la capacidad de investigación de un solo grupo o incluso de un país. Por ello, es prioritario tener al menos un conjunto de sitios y de países que de manera coordinada traten de contestar algunas preguntas básicas sobre el fenómeno (Munasinghe y Swart, 2005).

Dada su ubicuidad y sus impactos, el fenómeno de cambio climático es un tema crítico y la investigación ecológica a largo plazo es una estrategia fundamental para su estudio (Huber-Sannwald *et al.*, 2008). Así mismo, el entendimiento de los efectos del cambio climático sobre el ciclo del carbono, el nitrógeno, otros nutrientes y el agua, es necesario para desarrollar mejores métodos y prácticas de mitigación de los efectos del fenómeno y para buscar alternativas para conservar las funciones de los ecosistemas de las que se derivan los servicios ecosistémicos. El conocimiento de las consecuencias del cambio climático es también importante en diversos campos como la protección contra incendios forestales y el manejo del fuego, la conservación de biodiversidad en áreas naturales protegidas y el manejo de las zonas y recursos costeros.

El tema del cambio climático es especialmente relevante en el caso de México, considerando que nuestro país ha estado sujeto históricamente a ciclos de sequía con importantes consecuencias ecológicas y sociales (Acuña-Soto *et al.*, 2002), y que su territorio puede ser especialmente sensible a este fenómeno (Villers y Trejo, 1998; Peterson *et al.*, 2002; Martínez y Fernández, 2004; Manson *et al.*, 2009).

Métodos y variables. El estudio del impacto del cambio climático en los ecosistemas es complejo y requiere de la utilización de al menos tres enfoques complementarios:

- a) El seguimiento de variables meteorológicas clave para la detección de los cambios en el clima.
- b) La utilización de experimentos en los que se incluya de manera explícita la manipulación de variables climáticas específicas.

12. Svante Arrhenius describió el mecanismo de aumento de la temperatura relacionado con el incremento en la concentración de CO₂ en la atmósfera en la última década del siglo XIX (Arrhenius, 1896) y en 1938 Guy Stewart Callendar planteó la hipótesis de que las emisiones antropogénicas de GEI por la quema de combustibles fósiles podían causar una alteración del clima global (Fleming, 2007).

- c) La utilización de modelos de simulación que puedan acoplar variables biogeoquímicas, el cambio de uso del suelo y diversas variables atmosféricas.

Las variables climáticas que deben seguirse en el tiempo incluyen, por lo menos: la temperatura (máxima y mínima), la humedad relativa, la lluvia, el viento (velocidad y dirección), la presión atmosférica y la radiación. Sin embargo, desde el punto de vista de la relación del cambio climático y el carbono, también es importante medir concentraciones y flujos de carbono. El seguimiento de las variables lleva implícita la existencia de la infraestructura que permita medirlas, como estaciones meteorológicas, radiómetros, evaporímetros y en el más largo plazo, torres con sensores que permitan medir gradientes en las variables meteorológicas.

El enfoque experimental involucra el manejo de variables que se consideran reguladoras de ciertos procesos. El cambio climático involucra un aumento en la temperatura. En el caso de los ecosistemas templados, donde la variación anual de la temperatura afecta de manera importante la producción primaria y la descomposición, la manipulación de la temperatura del suelo puede contribuir al entendimiento de las consecuencias del aumento de la misma en la descomposición y la mineralización de carbono y nutrientes. En el caso de los ecosistemas de selvas secas estacionales y zonas áridas y semiáridas, la variación en la disponibilidad de agua es fundamental. En estos casos, el enfoque experimental está orientado a la manipulación de la disponibilidad de agua en diversos procesos. Existen ecosistemas para los que la relación entre el aumento de temperatura y la disponibilidad de agua puede jugar un efecto sinérgico regulador, como es el caso de los ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, y los ecosistemas costeros con déficit hidráulico interanual.

Para implementar investigación sobre el efecto del cambio climático en los ecosistemas terrestres, costeros y marinos es necesario partir de la existencia de una infraestructura mínima necesaria como la mencionada anteriormente para dar seguimiento al comportamiento de las variables climáticas. Los protocolos de medición deben ser

uniformes, así como el equipo que se utiliza para medir. Desde el punto de vista experimental, la situación ideal es partir de las predicciones que hacen los modelos para regiones específicas para el diseño de experimentos relevantes. Esto puede no ser factible en muchos casos y se puede seguir un procedimiento más empírico. Por ejemplo, identificar ecosistemas en los que la disponibilidad de agua sea crítica y diseñar experimentos específicos en los que se manipule la humedad del suelo para medir, por ejemplo, patrones de mineralización de carbono y nutrientes. Este tipo de experimentos se pueden realizar sin muchas sofisticaciones metodológicas, pero requieren de un mínimo conocimiento sobre los patrones y cantidades de lluvia de los sitios particulares para tener un sentido ecológico realista.

En el caso de ecosistemas cuya vegetación no es muy alta se han construido sistemas automatizados sofisticados para modificar la cantidad y la distribución de la lluvia, pero ello sería difícil para vegetación arbórea. También se pueden diseñar experimentos en los que se modifique la temperatura del suelo en aquellos ecosistemas en que las temperaturas mínimas regulan los procesos biológicos (por ejemplo, los bosques de coníferas y los bosques mesófilos de montaña). Sin embargo, requieren de mayor sofisticación tecnológica para realizarlos ya que se necesitan aparatos para modificar, controlar y registrar la temperatura del suelo.

Infraestructura. Para explorar la interacción de variables, incluidos los cambios en la concentración de CO_2 , se requieren cámaras de ambiente controlado, o para el caso del CO_2 , contar con la tecnología denominada FACE (*free air chamber experiments*) que se utiliza en la actualidad para investigar los efectos del aumento de dicho gas atmosférico sobre aspectos ecofisiológicos y ecosistémicos. La medición de los flujos de CO_2 entre la vegetación arbórea y la atmósfera requiere de torres y grúas que permitan utilizar la técnica de *eddy-covarianza*, lo cual implica una inversión considerable de recursos.

La utilización de modelos de simulación representa otra herramienta para explorar a nivel local y regional tanto el impacto de la variación atmosférica sobre los ecosistemas como la retroalimentación debida a los cambios en el uso

del suelo y de la cobertura vegetal. Existen modelos como el Century (Ojiva *et al.*, 1993; Parton *et al.*, 1994) capaces de integrar y proporcionar elementos de análisis y simulación en este contexto, pero que requieren de la capacitación de personal o del establecimiento formal de colaboración con expertos en varias disciplinas relacionadas a la modelación de ecosistemas.

4.2.6. Interfase de ecosistemas naturales y manejados

Marco teórico. El impacto global de las actividades humanas afecta en diferente grado a los ecosistemas del planeta. Uno de los aspectos más importantes del cambio global es la pérdida de hábitats naturales (Vitousek, 1992; Hunter, 1996). En los ecosistemas terrestres esto se manifiesta en la reducción neta (deforestación) y fragmentación de la superficie de bosques, selvas, matorrales y pastizales naturales (Lindenmayer & Fischer, 2006; Challenger & Dirzo, 2009). En los ambientes costeros el desarrollo urbano, turístico e industrial, así como la construcción de infraestructura como carreteras y puertos, han reducido significativamente el área de humedales y alterado los sistemas de playas y costa rocosa, al mismo tiempo que han modificado las condiciones hidrológicas y se han generado descargas de aguas residuales afectando al hábitat y las comunidades de vegetales y animales (Lomelí *et al.*, 1999; Yañez-Arancibia y Day, 2004; Bezaury-Creel, 2005; Howarth, 2005; Boesch, 2006). En los mares se observan los efectos críticos de la influencia humana de la contaminación y eutrofización (Howarth, 2005; Turner *et al.*, 2006), acidificación de los océanos (Guinotte *et al.*, 2008; Doney *et al.*, 2009) y sobrepesca (Crowder *et al.*, 2008), que provocan alteración del funcionamiento de los ecosistemas marinos y afectan su biodiversidad.

La superficie mundial de bosques (formaciones vegetales dominadas por árboles, *i.e.* componentes leñosos mayores a 3 m de altura) asciende a 3,500 millones de hectáreas, esto es, un tercio de las tierras emergidas (FAO, 1997), pero esta extensión está disminuyendo rápidamente. Entre 1990 y 1995 la deforestación —la pérdida neta de superficie forestal— fue de 56

millones de hectáreas, resultado de la reducción de 65 millones de hectáreas de bosques, principalmente en los países en vías de desarrollo, y de un incremento de solo 9 millones de hectáreas por plantaciones y regeneración natural, principalmente en los países desarrollados. Estos datos indican que el área deforestada es siete veces mayor que el área recuperada. Entre 1990 y 1995 en América del Norte la superficie forestal aumentó en 3.8 millones de hectáreas, mientras que en América Latina y el Caribe se redujo en 29 millones de hectáreas, esto es, una tasa de deforestación de alrededor de 5.8 millones de hectáreas anuales (FAOSTAT, 1997). Sin embargo, la deforestación no es la única transformación que está ocurriendo en los ecosistemas forestales a escala global. Además del cambio neto negativo en la superficie de la cubierta boscosa, las extensiones remanentes sufren transformaciones en su composición de especies, estructura, dinámica y funcionamiento, debido a un conjunto de factores que van desde la extracción comercial de madera, el pastoreo o los incendios, hasta la contaminación atmosférica (Vitousek *et al.*, 1997). Además de la *deforestación*, otros cuatro factores deben ser considerados en el análisis de la transformación de los bosques y otros ecosistemas naturales terrestres: la fragmentación, la secundarización (aumento proporcional de bosques y matorrales secundarios y reducción de los bosques maduros o viejos), degradación y sobreexplotación (Jardel, 2008).

La fragmentación es una consecuencia de la deforestación y consiste en la formación de parches de bosque o hábitat remanente rodeados por una matriz de paisajes transformados a otros tipos de cobertura (por ejemplo tierras de cultivo, pastizales, infraestructura y zonas urbanas), con la pérdida de conectividad entre los rodales que, originalmente, formaban una masa forestal continua (Cadenasso *et al.*, 1997, 2003a, 2003b; Laurence *et al.*, 1997; Fahrig, 2003; Lindenmayer & Fischer, 2006). En las áreas de contacto del perímetro de los parches de hábitat fragmentado y la matriz circundante, se producen cambios en las condiciones del ambiente físico y en la composición de especies, que se conocen como *efecto de borde* (Murcia, 1995; Gehlhausen *et al.*, 2000). El efecto de borde se puede definir como

la interacción entre dos ecosistemas adyacentes separados por una transición abrupta. Este efecto favorece a algunas especies que aprovechan las condiciones producidas entre el hábitat natural y la matriz transformada, mientras que las especies del interior del hábitat natural pueden ser afectadas negativamente (Gascon *et al.*, 1999; Gehlhausen *et al.*, 2000; Harper *et al.*, 2005). Los bordes son el área más alterada de un hábitat natural fragmentado. La combinación de la reducción de la superficie de los fragmentos de bosque, la pérdida de conectividad entre éstos y el efecto de borde implica cambios críticos para la composición de especies y las funciones ecológicas de los fragmentos de bosque remanentes (Lindenmeyer & Franklin, 2002). La magnitud de estos cambios depende del grado de transformación de la matriz y qué tan contrastante es ésta con el hábitat fragmentado.

Las consecuencias ecológicas de la fragmentación han sido analizadas en trabajos pioneros como los de Curtis (1956) y Mac Arthur y Wilson (1967), y dieron origen a la teoría de biogeografía de islas que forma parte del bagaje conceptual de la conservación biológica (Hunter, 1996). La fragmentación implica cambios en las condiciones de los bordes de los parches de bosque y otros tipos de hábitat, que favorecen positivamente a algunas especies, como plantas heliófilas, venados o aves rapaces, pero afecta negativamente a plantas y animales que dependen de las condiciones del interior (Harris, 1984; Bierregaard *et al.*, 1992; Laureance *et al.*, 1997), provocando aumentos en las tasas de depredación o parasitismo sobre las aves (Brittingham y Temple, 1983), reduciendo el área de hábitat necesaria para mantener poblaciones viables (Wilcox *et al.*, 1986) y alterando los procesos de reproducción, flujo genético, dispersión y colonización de organismos, con consecuencias sobre la diversidad genética y de especies (Nason *et al.*, 1997).

El aumento en la superficie de bordes provoca cambios en la dinámica de las poblaciones locales y en la estructura de las comunidades de diferentes organismos, alterando la abundancia y riqueza de especies, propiciando las invasiones de especies así como cambios en la estructura trófica del ecosistema. Por ejemplo, se ha encon-

trado que la fragmentación reduce el potencial regenerativo de la selva, en parte mediante un decremento en el número de animales que polinizan las flores y que dispersan las semillas de los árboles tropicales. Similarmente, la fragmentación induce cambios ambientales que producen un aumento en la mortandad de árboles y evitan la germinación de semillas y el establecimiento de plántulas (Williams-Linera, 1993; Laureance *et al.*, 1997; Williams-Linera *et al.*, 1998; Gascon *et al.*, 1999; Gehlhausen *et al.*, 2000; Harper *et al.*, 2005).

Otro aspecto de la transformación de los ecosistemas forestales es la *secundarización* (Harris, 1984; Jardel, 2008). Consiste en el aumento de la proporción de rodales en etapas tempranas de la sucesión en el conjunto del bosque, como resultado de perturbaciones naturales o antropogénicas. Una consecuencia del aprovechamiento maderero y del abandono de los terrenos abiertos para las actividades agropecuarias es la reducción proporcional de la superficie de bosques maduros o viejos y el aumento de bosques jóvenes o secundarios que se regeneran en los claros, tanto en zonas templadas y boreales (Harris, 1984) como tropicales (Brown y Lugo, 1990). Los bosques secundarios tienen propiedades de composición de especies, estructura y funcionamiento —por ejemplo la dinámica de los ciclos de nutrientes y el agua— diferentes a la de bosques maduros y viejos (Bormann & Likens, 1979) y desde el punto de vista económico la calidad y cantidad de las existencias de madera y su valor son más reducidos (Dudley *et al.*, 1995; Jardel, 1998). Actualmente una gran proporción de los rodales en bosques y selvas son secundarios, esto es, se han establecido en los claros abiertos por la extracción de madera o los desmontes, a través de procesos de regeneración natural o por el establecimiento de plantaciones (Harris, 1984; Brown y Lugo, 1990; Jardel, 1998).

También es importante considerar cuál es el estado de los bosques remanentes de la deforestación. Muchas áreas que mantienen cobertura forestal y que no se consideran deforestadas han sufrido un proceso de degradación. Podemos hablar de degradación cuando un ecosistema forestal ha sufrido cambios en sus atributos,

como la reducción de la biomasa, pérdida de la fertilidad del suelo, empobrecimiento en su riqueza de especies, o aumentos en la mortalidad de árboles y la susceptibilidad al ataque de patógenos y parásitos; desde el punto de vista económico, la degradación puede entenderse como una disminución cualitativa y cuantitativa en las existencias de madera y otros recursos, con una reducción en su valor (Jardel, 2008).

En el caso de los ecosistemas forestales, la degradación consiste en la pérdida de ciertos atributos o componentes como consecuencia directa o indirecta de actividades humanas y se manifiesta como una alteración de su funcionamiento. Varios indicadores pueden ser utilizados para evaluar la degradación de un ecosistema forestal (Jardel, 2008). Los indicadores más básicos son la pérdida de superficie o cobertura de bosque y el grado de fragmentación del área remanente; esto puede evaluarse utilizando información cartográfica de fechas múltiples o comparando la distribución actual de un tipo de vegetación o hábitat con su distribución potencial en función de las condiciones físico-geográficas (Jardel *et al.*, 2004c). Otros indicadores pueden generarse por comparación con áreas que muestran poca influencia humana, o utilizando como referencia registros o información histórica (Egan & Howell, 2005). Entre estos indicadores pueden considerarse la disminución en la riqueza de especies nativas y en el tamaño de sus poblaciones, el aumento de poblaciones de especies exóticas, la pérdida de componentes de hábitat esenciales para la fauna silvestre, la reducción de la biomasa de plantas, la acumulación de materiales combustibles y el aumento del peligro de incendios, el aumento en superficie afectada por brotes de plagas o enfermedades, la pérdida de la calidad y cantidad de existencias de recursos como la madera, el aumento de la erosión y sedimentación y sus efectos sobre la calidad del agua que sale de una cuenca forestal (Jardel, 2008). Este tipo de indicadores pueden ser cuantificados y comparados con información sobre el estado del ecosistema anterior a su degradación, o si no se dispone de datos históricos la comparación puede hacerse con otros ecosistemas similares que sirven como referencia. En ciertos casos pueden usarse incluso indicadores

subjetivos, pero evaluables, como la pérdida de atractivo o valor estético desde la perspectiva de los visitantes en áreas de recreación.

Por último, otro componente de la transformación de los ecosistemas forestales remanentes es la sobreexplotación, esto es, la cosecha o extracción de recursos forestales maderables y no maderables a una tasa que es superior a su capacidad para regenerarse. Esto se refleja, por ejemplo, en la disminución de las existencias de madera, que ya fue considerada como un indicador de degradación. La explotación dirigida a las especies de mayor valor comercial y a los árboles de mayor talla y mejor conformación, da lugar a bosques con menor valor comercial (Jardel, 1998). Este proceso se conoce como “descreme”, y además de sus consecuencias económicas tiene efectos sobre la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas forestales

Relevancia. Debido a la creciente influencia humana en los ecosistemas a escala planetaria (Vitousek *et al.*, 1997; Rockström *et al.*, 2009), el entendimiento de las interacciones entre los ecosistemas naturales y transformados es un tema de especial relevancia. La investigación ecológica a largo plazo es una estrategia de estudio que permite entender las consecuencias de estas interacciones. En el caso de ambientes terrestres (incluyendo los cuerpos de agua epicontinentales que se encuentran en medio de éstos), uno de los temas de investigación identificados como prioritario es el efecto de los procesos de pérdida, degradación y fragmentación de hábitat en el funcionamiento de los ecosistemas. El conocimiento de estos procesos y sus efectos aporta los fundamentos para el diseño de prácticas adecuadas de conservación biológica y restauración de hábitat (Hunter, 1996). En el caso de ambientes marinos y costeros es importante entender cómo los cambios de uso del suelo y las actividades humanas en las costas afectan el funcionamiento de los ecosistemas (Yáñez-Arancibia & Day, 2004).

La pérdida de hábitat y la fragmentación se han convertido en las más importantes amenazas para el mantenimiento de la biodiversidad en todos los ecosistemas terrestres y acuáticos (Harris, 1984; Hunter, 1996; Lindenmeyer & Fischer, 2006). La presencia de bordes es un componente prominente en el paisaje de la ma-

yoría de los sistemas naturales terrestres y se tienen que proponer métodos de manejo para controlar o mitigar sus efectos sobre la biota. La fragmentación es además un fenómeno que afecta la viabilidad de las áreas naturales protegidas y su efectividad para la conservación de la biodiversidad y las funciones de los ecosistemas, especialmente en el contexto del cambio climático global.

Métodos y variables. El estudio de los cambios en la cobertura de la vegetación, tipos de hábitat y usos del suelo se lleva a cabo utilizando fotografías aéreas e imágenes de satélite de fechas múltiples. Ejemplos de los métodos de estudio del cambio de cobertura y uso del suelo se encuentran en Dirzo y García (1992) y Mather (1999). Estos estudios se relacionan también con otras áreas temáticas de interés de la Red MEX-LTER como la dinámica del agua, carbono y nutrientes, debido al impacto que tienen los cambios de cobertura y uso del suelo en estos procesos en la interfase sistemas terrestres-acuáticos (Bormann & Likens, 1979; Murdiyarsa & Warsin, 1995; Mander *et al.*, 2000).

Los patrones de fragmentación y atributos del paisaje como el número, forma, tamaño y proporción área/borde de los fragmentos, así como las condiciones de la matriz circundante pueden ser cuantificados y monitoreados utilizando mapas y sistemas de información geográfica. Turner (1989), O'Neill *et al.* (1989) y Baker (1989) presentan una revisión de los índices y de los modelos utilizados para el estudio de patrones en el paisaje y sus cambios a través del tiempo. Un ejemplo de métodos para el estudio cuantitativo de patrones del paisaje y fragmentación se encuentra en McGarigal y Marks (1995) (para un ejemplo del *software* utilizado en el análisis de la fragmentación véase: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html).

Para evaluar los efectos de borde sobre la biota y el ambiente abiótico es necesario establecer parcelas permanentes de muestreo a diferentes distancias a través del borde entre su interior (la vegetación natural remanente) y la matriz de vegetación alterada que hace contacto con el hábitat remanente. Esto último para observar si la vegetación nativa es capaz de colonizar y restablecerse en el hábitat alterado. El

número de parcelas de muestreo se determinará de acuerdo al ecosistema y a la variable física (temperatura, humedad, insolación, velocidad del viento) o biológica (fuentes de propágulos, interacciones bióticas, estructura de la vegetación, composición, diversidad, abundancia de diferentes especies de organismos, especies invasoras, etc.) a evaluar. Varios ejemplos de estudios sobre el efecto de borde en ecosistemas forestales se encuentran en Williams-Linera (1993), Williams-Linera *et al.* (1998), Laureance *et al.* (1997), Gascon *et al.* (1999), Gehlhausen *et al.* (2000), Oosterhoorn y Kapelle (2000), Harper *et al.* (2005) y Santiago *et al.* (2009).

Infraestructura. Como en otros estudios de campo a largo plazo, es conveniente contar con estaciones de investigación o con acuerdos establecidos con los propietarios de los terrenos, para poder establecer sitios permanentes de estudio y establecer con seguridad equipos de medición y marcas de los sitios, y mantenerlos a través del tiempo. Se requiere equipo para mediciones de la vegetación (clinómetros, cintas diamétricas, flexómetros, densitómetros, etc.) y para la colecta de material biológico, así como para monitorear las diferentes variables ambientales del clima y el suelo. El análisis del efecto de borde y tamaño y distribución de fragmentos con respecto a los componentes biológicos se ha facilitado mediante la implementación de metodologías como la de análisis de vacíos (*Gap Analysis*) y la utilización de *software* de sistemas de información geográfica (SIG). En el laboratorio se requiere equipo de cómputo y *software* especializado para el manejo de información geográfica y el análisis de patrones del paisaje, así como el equipamiento necesario para la identificación, procesamiento y preservación de especímenes biológicos.

4.2.7. Definición de criterios para el manejo de ecosistemas

Marco teórico. Entre los objetivos de los estudios ecológicos se encuentran tanto el entendimiento de los procesos y funcionamiento de los ecosistemas como la generación de nuevos conocimientos e instrumentos alternativos para resolver problemas ambientales, de conservación eco-

lógica y de manejo sustentable de los recursos naturales (Likens, 1998). Frente a los procesos de deterioro ecológico —como el cambio climático global, la deforestación, la contaminación atmosférica, la erosión, la eutrofización, la extinción de especies, las invasiones de especies exóticas, etc.— y de agotamiento de recursos naturales —como la reducción de las existencias de madera en los bosques, la pérdida de productividad de los suelos agrícolas o la declinación de las pesquerías— se espera que la ciencia de la ecología aporte conocimientos, información, modelos, principios, criterios e indicadores aplicables a la resolución de esta amplia gama de consecuencias del impacto humano en los ecosistemas.

Una limitación importante de la ecología, como ya se señaló en otras partes de este documento, es que muchos de los estudios ecológicos se han realizado en áreas relativamente pequeñas por periodos cortos de observación o experimentación, mientras que los fenómenos ecológicos ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales, que pueden abarcar miles de hectáreas y cientos de años (Urban *et al.*, 1987; Levin, 2000). Los impactos ecológicos de las actividades humanas tienen efectos a largo plazo en áreas geográficas extensas y sus efectos son en muchos casos sutiles o no se manifiestan de manera inmediata (McDonnell & Pickett, 1993; Gosz, 1999; Schneider, 2002). Tomando esto en consideración, la investigación ecológica a largo plazo juega un papel fundamental para el entendimiento del impacto humano en los ecosistemas y para el diseño de alternativas de manejo (Franklin *et al.*, 1990; Likens, 1998; Walters, 1998). Es importante reconocer que la necesidad de generar conocimiento ecológico aplicado al manejo sustentable de los recursos naturales y los ecosistemas y al entendimiento de las interacciones entre las sociedades humanas y la naturaleza, fue una motivación central en el origen y el proceso de establecimiento de muchos de los proyectos y de los sitios que actualmente forman la Red Internacional de Investigación Ecológica de Largo Plazo.¹³

La ciencia de la ecología aporta de manera importante las bases teóricas y conceptuales de la gestión ambiental y el manejo de los recursos naturales. Gestión es un término utilizado en español y otras lenguas latinas como sinónimo de manejo —*management* en inglés— aunque puede hacerse una diferencia en la forma en que ambos términos se aplican. *Gestión* se refiere a una serie de procedimientos para lograr un fin determinado y a la acción y efecto de administrar, esto es, el proceso de planificar, organizar, dar seguimiento, controlar y evaluar la ejecución de acciones con propósitos determinados, como la protección y el mejoramiento del ambiente en el caso de la gestión ambiental. El término *manejo* se refiere más específicamente a las intervenciones directas que se llevan a cabo, como parte del proceso de gestión, para manipular ciertos componentes o variables exógenas que determinan el comportamiento de un sistema, como puede ser una población de árboles para la producción de madera, el territorio de un área protegida o un lago dedicado a la pesca y la recreación.

El manejo implica intervenir sobre variables ecológicas o sociales, y las intervenciones pueden ser de carácter técnico, institucional o comunicativo (Castillo *et al.*, 2005; Jardel *et al.*, 2008). Por ejemplo, en el manejo de un bosque con fines de producción maderera, las intervenciones técnicas consisten en la aplicación de cortas para controlar la composición de especies, la estructura de edades y tamaños, la regeneración y el crecimiento de un rodal, y en la aplicación de medidas de mitigación de impactos ambientales como la restricción de la corta en pendientes pronunciadas y en el margen de arroyos. En este ejemplo, las intervenciones institucionales incluyen la organización de una empresa forestal, el establecimiento de acuerdos para ejecutar un programa de manejo, para aplicar las normas legales y el reconocimiento de derechos de uso, acceso y control de la tierra y los recursos. Por último, las intervenciones comunicativas incluyen el intercambio de ideas y conocimientos para adoptar ciertas prácticas,

13. Esta motivación estuvo presente, por ejemplo, en el desarrollo del Programa Biológico Internacional en la década de

1960, en el origen de las reservas de la biosfera del Programa MAB de la UNESCO en la década de 1970 (Batisse, 1986; Halffter, 1988) y en el surgimiento de las redes nacionales de investigación ecológica a largo plazo alrededor del mundo.

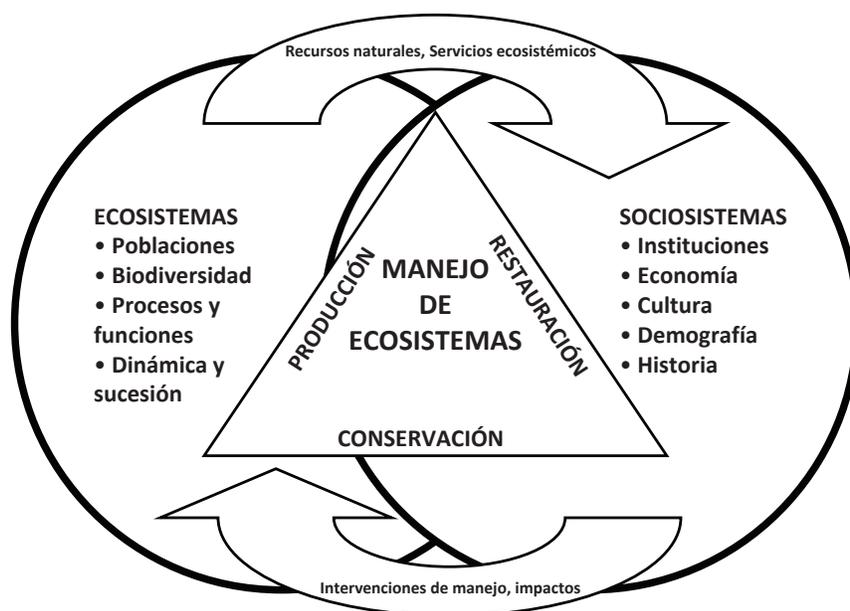


Figura 6. Modelo conceptual del manejo de ecosistemas. El manejo integra tres componentes: la producción o aprovechamiento de recursos naturales, la conservación de los componentes y funciones de los ecosistemas, y la restauración o rehabilitación cuando han ocurrido procesos de degradación. El manejo se da en la interfase entre los ecosistemas y los sociosistemas. La sociedad obtiene recursos naturales (materias primas) y servicios ecosistémicos (de provisión, regulación y culturales) e influye en la dinámica y configuración interna (composición, estructura, funcionamiento) de los ecosistemas a través de la extracción de recursos, los impactos de las actividades humanas y las intervenciones de manejo; estos últimos están en buena medida determinados por la configuración y dinámica del sociosistema, que implica diferentes dimensiones de los procesos sociales —políticas, económicas, culturales y demográficas (Jardel, 2000; Jardel *et al.*, 2008).

conductas o valores en relación con el uso y la conservación del bosque.

Las intervenciones de manejo, aunque estén dirigidas solamente sobre un componente de un ecosistema —como la extracción de árboles maderables en un bosque o la captura comercial de peces en los océanos— afectan a otros componentes, a sus interacciones y a la dinámica y funcionamiento del ecosistema en su conjunto, y probablemente a otros ecosistemas adyacentes o interconectados.¹⁴ Tomando esto en consideración, el manejo constituye una intervención en la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas, por lo cual se ha planteado la necesidad de adoptar un enfoque ecosistémico del manejo (Franklin, 1990).

El manejo tiene lugar en la interfase entre los sistemas sociales y los sistemas ecológicos (figura 6), y en gran medida está determinado por los primeros; el manejo es en sí un proceso social por dos razones: la primera es que está dirigido por objetivos y aspiraciones de la gente —producir bienes para la economía, conservar un paisaje ameno, mantener la calidad de las fuentes de agua, etc.— y la segunda es que el manejo se lleva a cabo a través de organizaciones humanas (Jardel, 2000). El reconocimiento de esto implica la necesidad de entender los procesos ecológicos y también los procesos sociales, así como las interacciones sociedad-naturaleza (véase sección 4.2.8).

Las prácticas de aprovechamiento y producción, las medidas de protección ambiental, conservación de la naturaleza y restauración o rehabilitación de áreas degradadas son actividades humanas de intervención sobre los com-

14. Ejemplos de esto se pueden encontrar para el caso de bosques en Bormann y Likens (1979) y pesquerías en Crowder *et al.* (2008).

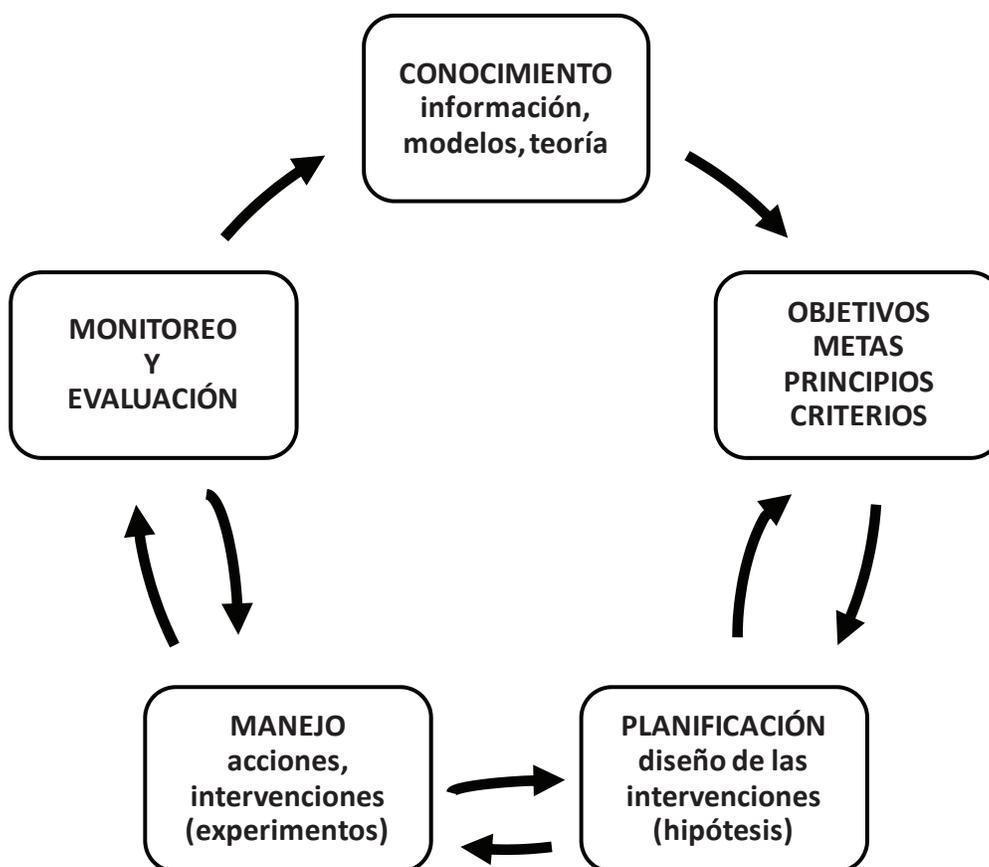


Figura 7. El manejo adaptativo puede ser esquematizado como un ciclo. El conocimiento derivado de la investigación científica y la experiencia práctica aporta información, modelos y la teoría que fundamentan la definición de objetivos y metas (establecidos por los actores involucrados) y los principios y criterios del manejo. Sin embargo, el conocimiento tiene siempre componentes de incertidumbre, debido a la naturaleza compleja y dinámica de los sistemas ecológicos y sociales; además el conocimiento científico es siempre aproximado y basado en probabilidades, pero es también perfectible. Si los planes y las prescripciones de manejo son diseñados como hipótesis de trabajo y las intervenciones de manejo son puestas en práctica como experimentos, el monitoreo y la evaluación permiten no sólo hacer ajustes frente a cambios no previstos, sino también generar conocimiento nuevo como parte de un proceso de adaptación y aprendizaje, que hace posible mejorar la teoría y los modelos, y replantear, corregir o adaptar las acciones de manejo (Holling, 1978; Walters & Holling, 1990; Franklin, 1990). Las intervenciones de manejo cubren áreas extensas y sus efectos se manifiestan a distintas escalas temporales, de modo que se requiere una estrategia de investigación y monitoreo de largo plazo.

ponentes, patrones, procesos y funciones de los ecosistemas. La esencia del manejo es la toma de decisiones sobre diferentes estrategias y acciones alternativas, lo que implica tener la capacidad de predecir sus posibles efectos futuros sobre los ecosistemas y los recursos (Walters, 1998). En este sentido, el manejo depende de la combinación del conocimiento científico y la experiencia práctica, no sólo para tomar decisiones adecuadas sino para monitorear y evaluar los resultados. Las prescripciones de manejo de-

ben ser consideradas como hipótesis de trabajo; los resultados de su aplicación no son enteramente predecibles y el manejo constituye en la práctica una forma de experimentación (Kohm & Franklin, 1997; Underwood, 1998). Dado que el conocimiento científico es incompleto y que los sistemas que estudia la ecología son complejos, la incertidumbre y la inexactitud están siempre presentes en los datos, las inferencias y los modelos (Hilborn & Ludwig, 1993; Hilborn & Mangel, 1997). Esto ha llevado a la necesidad

de plantear el enfoque de *manejo adaptativo*, esto es, un abordaje de las cuestiones del manejo de los ecosistemas y los recursos como un proceso de experimentación y aprendizaje continuos (Holling, 1978; Walters, 1988; Walters & Holling, 1990). La interacción continua entre la investigación ecológica, el monitoreo y el manejo —esto es, la aplicación de políticas, arreglos institucionales, prácticas de producción, conservación y restauración o rehabilitación, comunicación entre los actores involucrados, etc.— en la interfase entre ecosistemas y sociosistemas, es el elemento esencial del manejo adaptativo (Jardel, 2000). Este es un enfoque lógico bajo las circunstancias de incertidumbre que caracterizan la complejidad de los ecosistemas y los sociosistemas, así como las limitaciones del conocimiento que puede perfeccionarse y avanzar progresivamente, donde el manejo es diseñado para ampliar el aprendizaje y proveer su retroalimentación sistemática y continua a través de la observación y la experimentación (Kohm & Franklin, 1987). El enfoque de manejo adaptativo (figura 9) y la investigación ecológica de largo plazo están estrechamente ligados (Franklin *et al.*, 1990).

El enfoque de manejo de ecosistemas ha surgido como resultado de un mejor entendimiento de los procesos ecológicos, generado en buena medida a través de la investigación a largo plazo. El manejo de ecosistemas es definido como:

El manejo guiado por metas explícitas, ejecutado mediante políticas, protocolos y prácticas específicas, y adaptable mediante el monitoreo y la investigación científica, basado en nuestro mejor entendimiento de las interacciones y procesos ecológicos necesarios para mantener la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Christensen *et al.*, 1996).

La investigación ecológica de largo plazo ha hecho contribuciones significativas al manejo de recursos naturales y la gestión ambiental. Al mismo tiempo, el estudio de problemas de conocimiento aplicados y de los efectos de las prácticas de manejo ha producido aportaciones prácticas para el avance científico en ecología. Por ejemplo, el estudio de problemas prácticos de aprovechamiento sustentable y conservación de especies ha contribuido de manera impor-

tante al avance de la ecología de poblaciones (véanse ejemplos en Reynolds *et al.*, 2001), utilizando registros de captura, en el caso de la pesca y la caza, y observaciones continuas o experimentos de intervenciones de manejo. El entendimiento del efecto de perturbaciones y de procesos como la regeneración y sucesión en ecosistemas forestales ha estado estrechamente vinculado a problemas prácticos de silvicultura, manejo del fuego y conservación de hábitat (Kohm & Franklin, 1987). Los estudios experimentales de largo plazo en cuencas forestales —por ejemplo en sitios LTER como J. H. Andrews, Hubbard Brook o Coweeta (Bormann & Likens, 1979; Swank & Vose, 1994; Kohm & Franklin, 1997) han permitido avances significativos en el entendimiento de la dinámica de rodales, la productividad forestal, los procesos biogeoquímicos, la hidrología y los impactos de intervenciones de manejo como la corta y extracción de madera.

Relevancia. Esta área temática, centrada en la definición de criterios para el manejo de ecosistemas, cumple una función integradora de los resultados de los otros siete temas o líneas de trabajo de la Red MEX-LTER en la aplicación práctica del conocimiento ecológico en el país. Su relevancia se deriva del hecho de que la investigación ecológica a largo plazo está estrechamente vinculada con la gestión ambiental y el manejo de recursos naturales (Franklin *et al.*, 1990; Underwood, 1998).

Actualmente la política ambiental y la práctica del manejo de los recursos naturales están basadas en la aplicación de una serie de instrumentos legales, institucionales, técnicos y económicos que requieren de la investigación ecológica a largo plazo como fuente de información y conocimiento, como fundamento para el desarrollo de modelos de los efectos de las intervenciones humanas sobre patrones y procesos de los ecosistemas, como referencia y control experimental desde un enfoque de manejo adaptativo (Walters, 1988; Walters & Holling, 1990) y como medio de monitoreo y evaluación. Por ejemplo, las evaluaciones de impacto ambiental requieren del entendimiento de los efectos de perturbaciones antropogénicas sobre las funciones de los ecosistemas, a diferentes escalas espaciales

y temporales. Los programas de compensación por la protección de áreas silvestres por su importancia para la generación de servicios ambientales o ecosistémicos, necesitan fundamentarse en el entendimiento de procesos como el ciclo del agua y del carbono, así como del papel de la biodiversidad en el funcionamiento de los ecosistemas. El ordenamiento territorial requiere del conocimiento de los patrones y procesos ecológicos a escala del paisaje, de las interacciones en la interfase de ecosistemas naturales y transformados, y de los procesos sociales que determinan los patrones de ocupación del territorio y uso de los recursos naturales. Las medidas de mitigación del cambio climático y de adaptación a este fenómeno deben fundamentarse en el entendimiento de sus implicaciones sobre el funcionamiento de los ecosistemas.

Los resultados de investigación ecológica de largo plazo en los diferentes sitios de la Red MEX-LTER pueden proveer modelos útiles para la aplicación de los instrumentos de gestión ambiental y manejo de recursos naturales, sirviendo como áreas de referencia o controles experimentales. En el caso de los servicios ambientales (Daily, 1997), como captura de carbono, protección de cuencas o la producción de agua, que se derivan de procesos y funciones de los ecosistemas como los flujos de energía y materia, es necesario contar con la referencia de estudios a largo plazo y actividades de monitoreo sobre temas tales como el movimiento del agua, el carbono y los nutrientes, la productividad primaria o la variación de las condiciones del clima. En el manejo de áreas protegidas, la observación continua de la biodiversidad y de poblaciones de especies clave es esencial para evaluar la efectividad de las medidas de conservación. Para el aprovechamiento sustentable de pesquerías o de bosques, las observaciones a largo plazo son indispensables para pronosticar y evaluar los efectos de la extracción de los recursos sobre las poblaciones utilizadas y las condiciones de los ecosistemas de donde provienen. La selección de indicadores adecuados para evaluar las condiciones ambientales (Dale & Beyeler, 2001; Andreasen *et al.* 2001) requiere también de los resultados de los estudios de largo plazo.

El área temática de definición de criterios para el manejo y conservación de ecosistemas integra prácticamente la aplicación de todas las otras áreas temáticas y líneas de monitoreo planteadas para la Red MEX-LTER, uno de cuyos propósitos más importantes es generar información, conocimientos y modelos aplicables al manejo de ecosistemas a nivel regional y nacional. Esta área temática orienta su trabajo en las siguientes líneas de acción (Jardel *et al.*, 2008):

- a) La *integración y síntesis* de la información, los conocimientos, modelos y técnicas generados a través de la investigación en las diferentes áreas temáticas, para el establecimiento de principios, criterios, normas e indicadores¹⁵ que fundamenten el diseño de métodos, instrumentos (técnicos, institucionales y comunicativos) y prácticas adecuadas de manejo de ecosistemas.
- b) La *identificación y selección* de nuevas preguntas y temas de investigación ecológica a largo plazo que sean vigentes, relevantes, pertinentes y estratégicos para el manejo de ecosistemas, ayudando a construir una agenda de investigación en colaboración con los manejadores o usuarios de los resultados de los estudios ecológicos.
- c) La *evaluación*, a través de la investigación y el monitoreo, de la efectividad de los instrumentos de gestión ambiental y las prácticas de manejo de recursos naturales tales como el ordenamiento ecológico del territorio, la evaluación de impacto ambiental, las áreas naturales protegidas, los mecanismos de compensación por servicios ecosistémicos, los programas de manejo de recursos naturales, los ordenamientos pesqueros, la eva-

15. Los *principios* consisten en el enunciado de los lineamientos o guías conceptuales del manejo, fundamentados en la teoría científica, la experiencia y los objetivos sociales; son enunciados que sustentan la definición de criterios y normas y que sirven de marco de referencia para la toma de decisiones. Los *criterios* son elementos de juicio, basados en los principios, para diseñar las acciones de manejo y evaluar sus resultados; las *normas* son el enunciado de preceptos y reglas a los que debe ajustarse la toma de decisiones y la aplicación de las acciones; por último, los *indicadores* son elementos observables y evaluables (cualitativa o cuantitativamente), que sirven como indicios o señales para evaluar los resultados de las acciones de manejo.

luación y certificación de manejo forestal, los proyectos de restauración ecológica, las medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, por mencionar algunos.

- d) La *retroalimentación* de las políticas públicas, la planificación y la toma de decisiones en la aplicación de instrumentos de gestión ambiental y manejo de recursos naturales con un enfoque de ecosistemas.
- e) La *comunicación y entrega* de los resultados de la investigación ecológica a largo plazo a los diferentes usuarios para su aplicación atiende a cuestiones tales como el mejoramiento de las prácticas de aprovechamiento sustentable de recursos naturales, la conservación de hábitats y biodiversidad, la contención del deterioro ambiental y la restauración o rehabilitación de ecosistemas degradados.

Un aspecto de especial importancia es la vinculación de los sitios y grupos de investigación con los actores sociales y organizaciones que llevan a cabo el manejo de los recursos naturales. Los sitios de la Red MEX-LTER y varios de los que potencialmente pueden integrarse a ésta en el futuro, se encuentran dentro de áreas protegidas y particularmente reservas de la biosfera (Maass *et al.*, 2010), donde la vinculación de la investigación con la solución de problemas de conservación, restauración, producción y desarrollo social es un objetivo explícito de su concepción original (Halffter, 1984; Jardel, 1992). El diseño de estudios ecológicos de largo plazo relacionados con problemas regionales o locales de manejo y conservación, y la comparación entre diferentes sitios puede generar tanto resultados prácticos como contribuciones significativas al conocimiento ecológico a nivel internacional.

Métodos y variables. Como ya se señaló, esta área temática cumple una función integradora de las otras líneas de trabajo de la Red MEX-LTER. Algunas de sus actividades principales son las siguientes:

- a) La sistematización, integración y síntesis de los resultados del conocimiento y la información disponibles, traduciéndolos en propuestas de principios, criterios, normas e indicadores para el manejo de ecosistemas.

- b) La identificación de necesidades de conocimiento e información para el manejo de ecosistemas, conjuntamente con los actores involucrados en el manejo, y el diseño de una agenda de investigación que sería cubierta a través de las distintas áreas temáticas de la Red MEX-LTER (incluyendo la posible integración de nuevos temas en el futuro).
- c) La realización de proyectos de investigación específicos sobre manejo de ecosistemas.
- d) La comunicación y entrega, a través de métodos apropiados, de los resultados de la investigación que realiza la Red MEX-LTER.

Las actividades incluidas en los incisos a y b se llevarían a cabo a través de seminarios y talleres en los sitios de investigación, entre sitios y a nivel nacional o internacional, en el marco del enfoque de trabajo cooperativo que es parte de la filosofía de las redes de investigación ecológica a largo plazo. Los productos generados pueden comunicarse o entregarse en distintas formas, a través de publicaciones como manuales técnicos, libros de texto, artículos científicos y de divulgación, integración de sistemas de información y bases de datos, actividades de capacitación (cursos) y de divulgación (conferencias, talleres de educación ambiental, uso de medios masivos de comunicación, exposiciones, etc.), y participación a nivel local, regional, nacional o incluso internacional en la elaboración de planes, programas o proyectos relacionados con el manejo de ecosistemas. La comunicación y entrega de los resultados de la investigación a los tomadores de decisiones, a quienes manejan directamente los recursos y al público en general, debe considerarse como una tarea especialmente importante para la función social de la investigación ecológica (Castillo, 2000; Castillo y Toledo, 2000; Vaughan, 2005; Vaughan *et al.*, 2006) y para el cumplimiento de la misión de la Red MEX-LTER. La participación de especialistas en comunicación, divulgación de la ciencia y educación ambiental es indispensable para obtener los resultados deseados; para lograr esto es esencial la disposición de los científicos para compartir sus conocimientos y colaborar con los diversos actores involucrados en el manejo.

En esta área temática pueden desarrollarse también proyectos de investigación a largo plazo, centrados específicamente en el manejo de ecosistemas. Los problemas de manejo son muy variados y esto implica una amplia diversidad de temas y técnicas de estudio. El monitoreo y la experimentación deberían incorporarse como parte de los programas de manejo de recursos naturales y áreas protegidas; la vinculación de la investigación al manejo abre oportunidades muy interesantes para poner en práctica estudios experimentales a escalas espaciales y temporales extensas, aportando además información, conocimiento y entendimiento que retroalimenten al manejo. Los temas pueden ser seleccionados de acuerdo a problemas relevantes, vigentes y pertinentes para las regiones donde se ubican los sitios de investigación, y pueden establecerse estudios comparativos con otros sitios LTER de México y otros países.

Varios proyectos de los grupos de la Red MEX-LTER están relacionados directamente con el manejo (véase capítulo 5). Por ejemplo, algunos estudios experimentales en proceso abordan temas como los efectos de los desmontes agrícolas en cuencas hidrográficas en zonas de selva baja caducifolia (Chamela-Cuixmala), el papel de los incendios forestales y las prácticas de manejo del fuego en bosques de pino-encino (Sierra de Manantlán), los efectos del pastoreo en ecosistemas de pastizales y matorrales xerófitos (Gracilis, Mapimí), la gestión de zonas y recursos costeros y los efectos de la pesca o de problemas como la eutrofización, los cambios hidrológicos y la alta recurrencia de eventos de anoxia e hipoxia (Ecopey, Ecosistemas Costeros) y los resultados del control de la contaminación y la gestión de cuencas en la calidad del agua de ríos (cuenca del Río Ayuquila en la región de la Sierra de Manantlán).

Otro aspecto metodológico importante por desarrollar, es la incorporación de la participación ciudadana en diversos aspectos del monitoreo de variables ambientales, así como el uso de métodos de autodiagnóstico y de evaluación participativa.

Infraestructura. Las necesidades de infraestructura de campo y laboratorio incluyen componentes que ya han sido señalados para otras áreas temáticas y líneas de monitoreo: sitios con

la protección adecuada para asegurar que las parcelas permanentes, estaciones de medición u observación y experimentos de campo puedan mantenerse a largo plazo, equipo de cómputo y *software*, sistemas de información geográfica, bases de datos, y equipo especializado cuyas características varían de acuerdo a los temas particulares de estudio.

El establecimiento y mantenimiento de los sitios de investigación implica una estrecha vinculación con instituciones responsables del manejo de las áreas, propietarios de éstas (comunidades, ejidos, particulares, cooperativas pesqueras), organizaciones de productores, etc. El desarrollo de estudios experimentales requiere, en la mayoría de los casos, acuerdos y permisos de los responsables de las áreas, y puede necesitar permisos específicos para proyectos que impliquen manipulaciones experimentales e intervenciones de manejo, de acuerdo con la legislación vigente.

Base institucional y políticas de investigación. Más que la infraestructura, una condición indispensable para el desarrollo de la investigación ecológica a largo plazo vinculada con el manejo de ecosistemas, es la construcción de una base institucional apropiada y la adopción de políticas de investigación que estimulen la participación de los científicos en la práctica del manejo. Los grupos de investigación, y las instituciones de las cuales forman parte deben asumir compromisos explícitos de desarrollar un trabajo vinculado al manejo, estableciendo además relaciones y acuerdos de colaboración de largo plazo con los actores involucrados en el manejo (dependencias gubernamentales, organizaciones de productores, comunidades, asociaciones civiles, etc.). El diseño de las agendas de investigación con la participación y colaboración de estos actores es fundamental. Se requiere también establecer mecanismos de apoyo, como fondos para el financiamiento a largo plazo no sólo de la investigación en sí, sino también del trabajo de comunicación y entrega de resultados. Dentro de los centros de investigación y educación a los que pertenecen los integrantes de los grupos de la red, y a nivel de la política científica y educativa nacional, deben adoptarse no sólo acciones concretas de fomento y apoyo a la in-

vestigación ecológica a largo plazo, sino también mejorar los sistemas de evaluación y estímulo, valorando adecuadamente el trabajo aplicado, la incorporación de resultados a la práctica, y las actividades de comunicación, divulgación y capacitación, y no únicamente la productividad científica medida (en publicaciones dirigidas a la comunidad científica).

4.2.8. Socioecología: interacciones sociedad-naturaleza

La investigación ecológica ha estado generalmente centrada en el estudio de patrones y procesos de los ecosistemas, en áreas supuestamente prístinas o al menos bien conservadas con escasa influencia humana (Foster *et al.*, 2003). Algunas veces el componente humano es considerado, pero como un factor externo (esto es, tomando en cuenta los efectos ecológicos de las actividades humanas) o de contexto, percibido muchas veces como negativo. Incluso el factor humano es prácticamente ignorado; en muchos de los estudios ecológicos ha existido un sesgo hacia la selección de sitios de investigación aparentemente libres de perturbación antropogénica, aunque ésta en realidad se ha extendido a todos los rincones del planeta (Vitousek *et al.*, 1997; Ellis & Ramankutty, 2008), afectando la dinámica de los ecosistemas, a veces de manera drástica y otras a través de efectos sutiles, que no son fácilmente reconocibles y que se manifiestan en el largo plazo (McDonnell & Pickett, 1993). En otros casos, la investigación ecológica se ha centrado en el estudio específico del impacto humano en los procesos ecológicos y, como ya se señaló antes (secciones 2.3 y 4.2.7), el establecimiento de muchos programas de investigación ecológica a largo plazo ha estado motivado por el interés en entender mejor la interacción de los seres humanos con su entorno ecológico y aplicar este entendimiento al manejo de ecosistemas.

El factor humano debería ser considerado como un elemento clave en la interpretación del paisaje, los procesos ecológicos y las condiciones ambientales actuales (Day, 1953; McDonnell & Pickett, 1993; Jardel, 1998; Ellis & Ramankutty, 2008); pero además de esto, el estudio de las

“dimensiones sociales del cambio ecológico y las dimensiones ecológicas del cambio social” debe ser considerado como un campo de estudio de especial relevancia (Redman *et al.*, 2004).

Varios autores han hecho énfasis en la necesidad de entender mejor las interacciones entre las sociedades humanas y los ecosistemas (Naveh & Lieberman, 1974; Holling, 1978; Costanza *et al.*, 1993; Underwood, 1998; Pickett *et al.*, 2004; Castillo *et al.*, 2005; Haberl *et al.*, 2006; Ellis & Ramankutty, 2008; Rozzi *et al.*, 2010), considerando que esto debe constituir un tema central de estudio, una línea de investigación *socioecológica* a largo plazo (Redman *et al.*, 2004; Anderson *et al.*, 2010). En este campo de estudio y en la aplicación de la ecología a la solución de problemas ambientales, es indispensable la colaboración entre los ecólogos y los científicos sociales.

El estudio de las interacciones sociedad-naturaleza ha sido abordado por varias corrientes teóricas o escuelas, con diferentes enfoques, muchas veces contrapuestos o fragmentados,¹⁶ lo cual ha dificultado la construcción de un campo de estudio unificado (Young, 1974; Leff, 1986, 1994, 1998). Las disciplinas que estudian la interacción sociedad-naturaleza incluyen, entre otras, a la ecología humana (Young, 1974; Hawley, 1991), antropología ecológica (Hardisty, 1977; Orlove, 1980), etnoecología (Hernández X., 1970; Toledo *et al.*, 1978; Schultes & von Reis, 1995), socioecología (García, 2004), ecología histórica (Worster, 1985; Ponting, 1992; Whitney, 1994), ecología política (Robins, 2004), economía ecológica (Georgescu-Roegen, 1971; Martínez-Alier, 1992; Martínez-Alier & Roca, 2001), economía ambiental (Costanza, 1996), bioeconomía (Clark, 1989) y derecho ambiental (Brañes, 1994). Un reto importante para establecer un área temática de investigación socioecológica a largo plazo en la Red MEX-LTER es no sólo la definición sino la integración de un enfoque teórico y metodológico adecuado para el estudio de las interacciones entre la sociedad y los ecosistemas.

16. Esta división se debe al abordaje de las cuestiones ambientales o ecológicas desde distintas disciplinas de las ciencias sociales, como la antropología, la sociología, la economía o la ciencia política.

Las sociedades humanas interactúan con los ecosistemas a través de intercambios de energía, materiales e información, y tal relación está determinada en gran parte por la configuración interna y el comportamiento de los sistemas sociales o *sociosistemas*. La cuestión de la interacción sociedad-naturaleza puede ser abordada de distinta manera, ya sea considerando el componente humano como parte de los ecosistemas, haciendo énfasis en los intercambios de energía y materiales, analizando la relación entre la economía y la ecología o tomando a los seres humanos como un factor externo que interviene o influye en patrones y procesos ecológicos a través de intervenciones de manejo o impactos ambientales (Hall & Day, 1977; Odum, 1980; Pimentel, 1984; Soule *et al.*, 1991; Costanza *et al.*, 1993; Redman *et al.*, 2004). Otra manera de enfocar la investigación es haciendo un mayor énfasis en la configuración interna, la dinámica y el comportamiento de los sociosistemas y sus componentes o dimensiones culturales, políticas, institucionales, económicas y demográficas (figura 9). Cualquiera de estos enfoques puede ser válido, dependiendo de los objetivos de estudio. Por ejemplo, el propósito de una investigación puede centrarse en entender cómo las actividades humanas intervienen o influyen en los flujos de agua, carbono y nutrientes en una cuenca, o tratar de comprender los efectos de intervenciones de manejo en las condiciones de hábitat y la biodiversidad. En este caso el énfasis se centra en patrones y procesos ecológicos. En otros, la investigación estará dirigida a la búsqueda de una mejor comprensión de cómo los factores culturales, las relaciones sociales o los procesos económicos determinan la interacción de la sociedad con su entorno; por ejemplo, cuáles son las causas subyacentes de la deforestación, cómo se toman decisiones de manejo de los recursos naturales o cuáles son las consecuencias sociales y ecológicas de las políticas en materia ambiental y de manejo de los recursos naturales. En estos casos el énfasis se centra en el componente social.

El manejo de los recursos naturales y la gestión ambiental son procesos sociales —en cuanto implican el alcance de objetivos socialmente establecidos y la organización de actividades humanas para alcanzarlos— que se realizan en la

interfase de los ecosistemas y los sociosistemas (figura 6). Las intervenciones humanas en los ecosistemas generan cambios en la estructura, composición y funcionamiento de éstos; entender tales cambios es necesario para diseñar y poner en práctica medidas efectivas de producción sustentable, conservación de hábitat y diversidad, mantenimiento de procesos esenciales para la generación de servicios ecosistémicos, la mitigación de impactos ambientales y la restauración o rehabilitación ecológica. Desde otra perspectiva, el estudio a largo plazo de las interacciones entre la sociedad y la naturaleza, a través de las formas de manejo de los recursos, constituye un tema de investigación para la ecología humana (McDonnell & Pickett, 1993).

Desde su origen, en la Red MEX-LTER existe la inquietud de incorporar la dimensión social en su agenda de investigación. Además de las seis áreas temáticas de carácter más biofísico que conforman su agenda de investigación, se tiene un área temática que contempla la formulación de criterios para el manejo de ecosistemas (sección 4.2.7), en la cual se han considerado los aspectos sociales. En algunos grupos de investigación, se incluye estudios sobre temas sociales y de acuerdo con una encuesta realizada en 2005, 5 de los 11 grupos que conforman la MEX-LTER, tienen como parte de sus cuerpos de investigación a científicos de las disciplinas sociales (Meraz *et al.*, 2007).

La investigación socioecológica a largo plazo está siendo considerada como un área temática nueva para la Red MEX-LTER, y puede considerarse que es un campo de estudio en proceso de construcción. Esta área temática es, sin lugar a dudas, de gran relevancia por su aplicación directa en el manejo de los ecosistemas, en particular en lo que se refiere a las intervenciones de manejo de carácter institucional y comunicativo.

La necesidad de incluir la dimensión humana en el análisis de los ecosistemas se ha discutido extensamente en la literatura (McDonnell & Pickett, 1993; Gunderson *et al.*, 1995; Pace & Groffman, 1998; Endter-Wada *et al.*, 1998; O'Neill, 2001; Westley *et al.*, 2002; Foster *et al.*, 2003; Haberl *et al.*, 2006); cada vez hay una mayor aceptación al interior de la comunidad científica ecológica de la importancia de entender



Figura 8. La figura esquematiza los componentes de un sistema socioecológico, enfatizando en las dimensiones del subsistema social en interacción con los ecosistemas que constituyen su ambiente. El sistema social incluye un conjunto de componentes que pueden agruparse en culturales, político-institucionales, económicos y demográficos. El estudio de estos componentes es relevante para entender las interacciones entre los sistemas sociales y los sistemas ecológicos (Jardel *et al.*, 2008).

los factores sociales, económicos, políticos y culturales que explican los cambios que están ocurriendo en los ecosistemas en diferentes escalas, desde lo local y lo regional a lo global. La figura 9 muestra las dimensiones culturales, político-institucionales, económicas, demográficas e históricas relevantes para un enfoque de investigación socioecológica.

Las redes de investigación ecológica de largo plazo (LTER) tienen como un objetivo central —además de la generación de un entendimiento sobre la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas— producir conocimientos que sirvan de base para comprender las relaciones entre las sociedades humanas y los ecosistemas. Un aspecto importante es entender el efecto que las actividades humanas tienen sobre los ecosistemas. Existe también un gran interés para que el conocimiento que se produce pueda ser de utilidad para la toma de decisiones y la formulación de políticas públicas (Meraz

et al., 2007). En años recientes se ha propuesto incluso que estas redes se transformen en redes de investigación socio-ecológica de largo plazo (Redman *et al.*, 2004; Gragson & Grove, 2005; Haberl *et al.*, 2006). El concepto central en esta propuesta es el de sistema socio-ecológico (Gallopin *et al.*, 1989) el cual se define como un sistema de elementos biofísicos y sociales que interactúan regularmente, en el cual circulan y son regulados un conjunto de recursos críticos. Estos sistemas, además, se pueden definir a diferentes escalas y se reconoce que poseen capacidades de adaptación (Berkes & Folke, 1998). Un enfoque de redes de investigación socio-ecológica considera varias ventajas tales como que las preguntas científicas se pueden desarrollar tanto sobre los procesos ecológicos como los sociales, que se pueden hacer comparaciones entre sitios, que además de hacer descripciones de los fenómenos e inventarios se pueden construir explicaciones y proyecciones a futuro sobre la dinámica

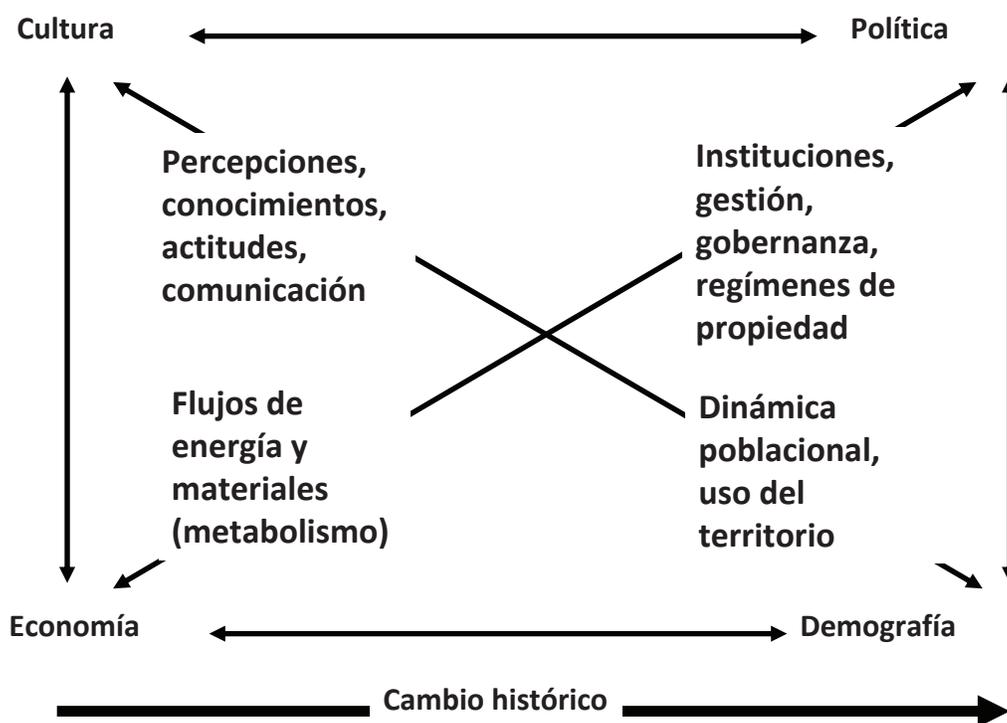


Figura 9. La figura presenta algunos temas de la investigación socioecológica a largo plazo y sus relaciones, incorporando la dimensión temporal del cambio histórico.

de los sistemas analizados y que se promueven nuevas áreas de investigación interdisciplinaria que permiten la formulación de hipótesis y la construcción teórica, además de generar conocimiento útil para la toma de decisiones (Meraz *et al.*, 2007).

Varias propuestas han sido planteadas para la investigación socioecológica a largo plazo. Redman *et al.* (2004) consideran que, además del estudio de los patrones y procesos ecológicos que tradicionalmente se abordan en las redes de investigación ecológica de largo plazo, se deben investigar los procesos sociales. Los temas centrales que proponen son demografía, cambio tecnológico, crecimiento económico, instituciones políticas y sociales, análisis de la cultura y del conocimiento e intercambio de información. Los ejes que se sugieren en este trabajo para la conexión entre los sistemas sociales y los ecosistemas son entender las decisiones que se hacen sobre el uso del suelo y los recursos naturales, los análisis sobre sistemas productivos, así como sobre los patrones de consumo y la generación

de desechos que hacen las sociedades hacia los sistemas naturales. Gragson y Grove (2005) han hecho un llamado para incorporar en la investigación ecológica a largo plazo el estudio de la dimensión social, exhortando a las distintas disciplinas de las ciencias sociales a participar en estudios vinculados con las redes de investigación existentes. Finalmente Haberl *et al.* (2006) proponen el estudio de la interacción sociedad-naturaleza desde la perspectiva del metabolismo social. Esto es, analizan los procesos de apropiación de bienes y servicios de los ecosistemas por los grupos humanos, la transformación, distribución y consumo de éstos al interior de las sociedades y la excreción de desechos hacia los sistemas naturales, producto de las actividades antes mencionadas (Fischer-Kowalski & Hüttler, 1998). Algunos de los temas de investigación que se han propuesto en los trabajos citados para abordar el análisis de los sistemas socioecológicos en el contexto de transformación de las redes de investigación ecológica de largo plazo en redes de investigación socioecológica de

largo plazo son el metabolismo social, el análisis de los paisajes y el cambio de uso del suelo, los procesos de toma de decisiones y gobernanza y la comunicación (Meraz *et al.*, 2007; figura 10).

En el armado de la agenda socioecológica de la Red MEX-LTER los temas serán abordados en una perspectiva diacrónica, que permitirá hacer tanto análisis históricos y prospectivos, como cortes sincrónicos para explicar los cambios y tendencias de los procesos que subyacen en cada tema. La idea es promover que en las investigaciones de los distintos sitios se retomen, de manera conjunta, algunos temas generales para su análisis, los cuales serán la conexión entre los diferentes elementos de los socioecosistemas. Por ejemplo, se propone el estudio de procesos como el cambio de cobertura y uso del suelo, ya que éste se considera el punto de contacto entre la agenda ecológica y la social, incluyendo sus distintas dimensiones culturales, institucionales, políticas, económicas y demográficas (figuras 8 y 9). Para ello habrá que identificar los diferentes factores de estas dimensiones que explican los cambios y responder a preguntas tales como: ¿Cuáles son los actores sociales involucrados y su origen o procedencia y las instituciones y cómo ha sido la interacción sociedad-naturaleza a través del tiempo? ¿Cómo han sido las transformaciones en el paisaje? ¿Cómo los cambios en la relación sociedad-naturaleza afectan a los ecosistemas y su capacidad de generar servicios ecosistémicos? ¿Qué preguntas de investigación son pertinentes ante los posibles escenarios socio-ecológicos de mediano y largo plazo? ¿Cómo es que la globalización afecta las decisiones y prácticas de manejo en los socioecosistemas a diferentes escalas? (Meraz *et al.*, 2007).

Es importante considerar que los sistemas socioecológicos (Berkes & Folke, 1998) son sistemas complejos (Gallopín *et al.*, 1989; García, 2006; Gunderson & Holling, 2002), que están constituidos por las interacciones, en tiempo y espacio, entre uno o varios sistemas socioculturales y uno o varios ecosistemas. El sistema sociocultural, formado en ambientes o contextos históricos particulares, involucra dinámicas e interacciones sociales complejas, en las que es posible observar un rasgo dominante, económico o cultural, a partir del cual se desatan nuevos

y entrelazados procesos sociales. Así mismo, los procesos sociales pueden tener efectos positivos o negativos sobre los socioecosistemas en los que ocurren, contribuyendo ya sea a la conservación de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas que lo forman o, por el contrario, sometiéndolos a situaciones de estrés tan intensas que pongan en riesgo la existencia misma del socioecosistema y, por lo tanto, su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos esenciales para la existencia de la sociedad. Aún más, los impactos ejercidos por los fenómenos socioculturales sobre los socioecosistemas afectan su vulnerabilidad. En sociedades divididas en clases sociales, los efectos del deterioro ambiental y, en general, la vulnerabilidad no son homogéneos sino que se distribuyen entre las clases sociales de acuerdo a un complejo conjunto de variables, entre las que destacan el poder político, la riqueza económica y la cantidad y calidad de información que cada clase disponga (Meraz *et al.*, 2007).

Es por todo lo anterior que para estudiar y comprender adecuadamente cualquier socioecosistema se requiere un abordaje interdisciplinario, que permita generar conocimiento para mantener o incrementar la resiliencia y capacidad adaptativa del sistema (Meraz *et al.*, 2007), lo que se puede lograr mediante, cuando menos, cuatro factores críticos: el aprendizaje para vivir en contextos cambiantes e inciertos; la aceptación y promoción de la diversidad para la reorganización y la innovación; la combinación de diferentes tipos de conocimiento (tradicional o científico) y la creación de oportunidades para la auto-organización (Folke *et al.*, 2003).

4.3. Líneas de monitoreo

El monitoreo consiste en la realización de observaciones y mediciones a largo plazo sobre un conjunto de variables clave. Lindenmayer y Likens (2010) definen al monitoreo como las mediciones de campo repetidas que son colectadas continuamente y analizadas por periodos largos de tiempo. Esta tarea juega un importante papel aportando información esencial para la investigación ecológica, la conservación

y el manejo (Goldsmith, 1991). La posibilidad de monitorear procesos en un sitio de estudio y de comparar datos entre distintos lugares a través del tiempo, es uno de los propósitos del enfoque de trabajo en las redes de investigación ecológica a largo plazo (Parr, 2010).

En el monitoreo pueden diferenciarse tres categorías generales: (1) el monitoreo “pasivo”, guiado solamente por la curiosidad, carente de un diseño específico, por lo cual sus resultados son limitados; (2) el monitoreo por mandato, en el cual los datos ambientales son colectados como un requerimiento de la ley o las directivas políticas, que es realizado por instituciones gubernamentales, y (3) el monitoreo dirigido a responder preguntas como parte de un programa de investigación (Lindenmayer & Likens, 2010). Es en esta última categoría en la que se enmarcan las líneas de monitoreo de la Red MEX-LTER.

De acuerdo con Lindenmayer y Likens (2010) un monitoreo efectivo requiere de un buen planteamiento de preguntas, un modelo conceptual del sistema de interés, una sólida colaboración entre investigadores y los encargados de elaborar políticas ambientales y manejar los recursos naturales y el uso frecuente de los datos colectados. Podemos agregar que otras partes esenciales del monitoreo son el mantenimiento y administración de bases de datos y sistemas de información (Equihua & López, 2008), un buen análisis periódico de los resultados y su comunicación y entrega a los usuarios. El monitoreo no tiene sentido si los datos no son de buena calidad, no se conservan a largo plazo, no se analizan y no se difunden y utilizan.

Para contar en el monitoreo con bases de datos y sistemas de información comparables, éstos deben de ser similares y compatibles. Cada grupo integrante de la Red MEX-LTER deberá, entonces, contar con cierta información básica estandarizada, protocolos de monitoreo comunes y realizar el monitoreo de una serie de variables ambientales consideradas clave. Hemos agrupado estas variables en seis líneas de monitoreo estrechamente ligadas a las áreas temáticas: clima, hidrología, substrato y suelos, flujos de energía y materiales, biodiversidad y poblaciones, productividad primaria y dinámica del paisaje y uso del suelo. Estas líneas de monitoreo se describen a

continuación. Es importante señalar que otras líneas de monitoreo deberán irse añadiendo con el tiempo; por ejemplo, un componente clave por desarrollar es el monitoreo de variables socioeconómicas, lo cual constituye aún una tarea pendiente.

Dependiendo del tipo de ecosistema, sea éste terrestre o acuático, los métodos y la relevancia de las líneas de monitoreo son diferentes. Dentro de cada tópico de monitoreo se han establecido cuatro niveles de detalle de la información requerida: un nivel “0” o mínimo indispensable de información básica, la que se considera como necesaria para caracterizar los sitios de estudio, seguido de tres niveles de creciente detalle o profundidad de la información que se espera obtener del monitoreo (niveles 1 a 3), que determinarán las prioridades para la obtención de datos. La información básica (nivel 0) se considera como un requisito que todos los grupos de investigación deben cubrir al momento de su incorporación a la Red MEX-LTER, y el nivel 1 constituye una meta a alcanzar en el corto plazo (uno o dos años) después del ingreso de un grupo. El nivel 2 de monitoreo es aquel indispensable para llevar a cabo el trabajo de ciertas áreas temáticas, pero que dada su complejidad no puede implementarse durante los primeros años. Finalmente el nivel 3 será el monitoreo deseable, aunque no obligatorio, a instrumentarse progresivamente de acuerdo a las condiciones específicas y las características de los sitios, así como de los objetivos y metas de investigación del grupo y los medios de trabajo (personal capacitado, recursos financieros, equipamiento) disponibles.

Los principales criterios que ayudarán a definir las variables a medir y su ubicación dentro del nivel de medición son los siguientes: 1. La naturaleza del fenómeno o variable que se quiere monitorear, con relación a su varianza, la frecuencia de oscilación y la sensibilidad a cambios ambientales, y 2. La complejidad técnica que tiene realizar dicho monitoreo, en términos del tipo de equipo o infraestructura de medición, las capacidades técnicas desarrolladas y el costo de mantenimiento del monitoreo.

El nivel básico corresponde a la información que permite describir características generales de

las condiciones del sitio y los fenómenos en estudio, las cuales representan un marco de referencia para los siguientes niveles de monitoreo. Generalmente estas variables se determinan en una sola ocasión o periódicamente en intervalos de tiempo largos, ya que sus cambios temporales son sumamente lentos a escala ecológica; tal es el caso de, por ejemplo, la estructura del relieve, el tipo de material parental de los suelos, el clima regional, o los mapas hidrológicos. También pueden incluirse aquí datos cuya generación es costosa y generalmente procede de fuentes diferentes a los grupos de investigación, como es el caso de la información sociodemográfica y económica.

El nivel 1 corresponde, por un lado, a componentes estructurales del sistema que cambian relativamente poco o lo hacen lentamente y son relativamente estables frente a cambios ambientales de corto plazo. Estos componentes —a los que no es necesario darles un seguimiento muy frecuente por su naturaleza— permiten interpretar las variables más dinámicas. Tal es el caso, por ejemplo, del banco de nutrientes del suelo y el uso actual del suelo. A este mismo nivel corresponden aquellas variables que controlan en forma significativa los procesos del ecosistema y cuyo monitoreo no es tan complejo, como son las mediciones meteorológicas o la producción de hojarasca.

El nivel 2 corresponde al monitoreo de componentes dinámicos del sistema, que incluyen a variables que cambian continuamente en el tiempo, por lo que es necesario darles un seguimiento más detallado. De igual forma, son variables que requieren mayor infraestructura y recursos humanos y económicos para llevar a cabo su monitoreo. Tal es el caso de variables como la radiación neta, índice de área foliar y flujos de nutrientes en el agua de lluvia.

Finalmente, el nivel 3 corresponde a aquellas variables cuya medición requiere de una infraestructura técnica y capacidades humanas muy especializadas o que, dada la naturaleza del fenómeno, precisan observaciones muy intensivas, en áreas extensas y por periodos prolongados. Ejemplo de estos procesos son la evapotranspiración, la lixiviación profunda y la dinámica de raíces en el suelo, así como los flujos de la materia orgánica y los nutrientes.

Para estandarizar los métodos de monitoreo y el manejo de la información, e ir fortaleciendo las capacidades de los grupos, se realizarán periódicamente talleres en los que se discutirá y determinará las variables específicas a medir y con qué periodicidad y métodos, esquemas de supervisión y control de calidad de los datos. En todos los casos habrá que desarrollar protocolos de medición y esquemas adecuados de calibración instrumental y metodológica. Idealmente, habrá que buscar que los equipos cumplan con las mejores normas de calidad y que éstas se cumplan a través de laboratorios especializados de verificación y certificación.

A continuación se presenta una descripción general de cada uno de los seis tópicos de monitoreo, indicando lineamientos para los cuatro niveles de monitoreo que se intentan abordar en la red. Debe dejarse claro que estos lineamientos son de carácter preliminar, pues se espera que a través de los talleres ya mencionados se afinen detalles y se hagan ajustes, acordando entre los miembros de la red los alcances de los procedimientos de monitoreo y detectando las limitaciones y ventajas existentes en métodos e infraestructura para llevarlos adelante.

4.3.1. *Clima*

Dado el papel fundamental del clima como factor de control de la dinámica ecológica, se considera esencial el monitoreo de la variabilidad climática. Se suele concebir la existencia de patrones definidos de comportamiento atmosférico (valores medios y su variación estacional) que pueden sintetizarse en forma estadística a partir de observaciones realizadas en plazos largos. Sin embargo, se aprecia que esta caracterización espacial puede cambiar en el tiempo (por ejemplo entre décadas) y para describir estos cambios es necesario expresarlos como anomalías, es decir como la diferencia entre el dato y el valor considerado “normal” o promedio. Finalmente, el comportamiento de la atmósfera puede interpretarse de distintas maneras según la escala de referencia. Usualmente se distingue entre el microclima de un sitio (por ejemplo las inmediaciones de una estación climatológica o un punto en el interior del bosque), el topoclima

de una localidad (un valle, una microcuenca), el mesoclima de una región, el clima sinóptico a escala continental y el clima global del planeta entero.

Nivel básico. Se requiere una descripción general del clima y su estructura espacial (mapas de tipos de clima, con isotermas e isoyetas a escala 1:250,000, que es la disponible en los mapas del INEGI a nivel nacional). Se requieren los datos de las normales climatológicas mensuales, al menos de temperatura media y precipitación, a partir de estaciones meteorológicas convencionales. Adicionalmente, es deseable contar con estadísticas mensuales de humedad relativa, insolación, nubosidad, vientos dominantes, curvas de probabilidad de lluvia, temperaturas extremas y fenómenos climáticos extremos como heladas, nevadas, sequías y huracanes.

Nivel 1. Se deberá contar con una estación meteorológica de “primer orden”, que mida en forma continua o por lo menos cada tres horas las siguientes variables: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa (o en su defecto temperatura de bulbo seco y húmedo), viento (dirección y velocidad), horas de sol y presión barométrica.

Nivel 2. En este nivel habrá que agregar instrumentos para la toma de datos de intensidad de precipitación, radiación solar (radiación neta y albedo), temperatura del suelo, evaporación en tanque (especialmente en zonas áridas o con fuerte estacionalidad) y punto de rocío. Además habrá que instrumentar el tendido de una red de estaciones auxiliares que registren variables identificadas como clave para la región, pero básicamente habrá que documentar la temperatura, precipitación, humedad y vientos. El enfoque deberá dirigirse a tipificar el topoclima de localidades selectas, y la red de estaciones deberá estar adecuadamente diseñada para tal fin, mediante el análisis de los patrones de correlación entre estaciones adyacentes, así como la configuración del terreno y su posible articulación con la red del Servicio Meteorológico Nacional.

Nivel 3. En este nivel habrá que profundizar el tendido la red de estaciones auxiliares iniciado en el nivel 2. Ahora el esfuerzo se dirige a tipificar el mesoclima de la región que circunscribe al sitio de estudio (atendiendo las mismas

consideraciones de diseño indicadas para el nivel 2). Además, a este nivel interesa la instalación de instrumentos en torres con objeto de medir gradientes verticales de variables identificadas como clave en el sitio (sobre todo en ecosistemas forestales), pero básicamente habría que considerar temperatura del aire, humedad relativa, radiación fotosintéticamente activa (RFA), y concentraciones de bióxido de carbono.

4.3.2. Hidrología

En los sitios de estudio correspondientes a ecosistemas acuáticos (cuerpos de agua dulce continentales como lagos, ríos, arroyos, humedales, estuarios, lagunas costeras y aguas oceánicas) o donde se considera la interfase tierra-agua, el monitoreo de factores hidrológicos es esencial (Wetzel, 1983; Allan, 1995; Mann & Lazier, 2000).

Nivel básico. Se requiere información básica sobre el patrón de drenaje superficial (mapas de hidrología de superficie), la forma y tamaño de los embalses o la línea de costa, la geomorfología de los márgenes de los cuerpos de agua o la línea de costa, los patrones de corrientes, la caracterización de los sistemas que aportan agua y sedimentos, las condiciones de clima descritas en el nivel básico de la sección anterior y otros aspectos descriptivos generales de los cuerpos de agua y sus cuencas.

Nivel 1. Las variables físicas que describen el comportamiento general del sistema y las condiciones generales que presentan poca variabilidad en periodos cortos de tiempo deben ser caracterizadas. En ríos y embalses es conveniente contar con información sobre el flujo base y niveles del agua, en ambientes costeros u oceánicos sobre el régimen de mareas y el patrón de circulación de corrientes. En lagos, esteros y lagunas costeras es importante considerar la caracterización de los flujos de aporte de agua dulce de la cuenca (aporte de ríos y canales, escorrentía superficial y de ser posible flujos subterráneos) y la influencia del viento y la temperatura atmosférica. En general se necesita caracterizar variables como pH, salinidad, alcalinidad, temperatura superficial, turbidez y sedimentos en suspensión. La temperatura superficial y concentración de pig-

mentos fotosintéticos puede hacerse por sensores remotos, pero es imprescindible contar con medidas de validación *in situ*.

Nivel 2. En este nivel se requiere la observación continua sobre factores de cambio temporal (estacional). En ambientes marinos, lagunas costeras y lagos, se requieren mediciones periódicas del patrón de circulación de corrientes, presencia de giros, surgencias y frentes, y la variación de condiciones físicas y químicas en la columna de agua (a diferentes profundidades), como la temperatura, luz, densidad del agua, salinidad, pH, oxígeno disuelto, CO₂, nutrientes y contaminantes. En relación con el componente de diversidad, es conveniente la caracterización del plancton, necton y bentos, y puede considerarse el monitoreo de grupos indicadores de calidad de agua. En ríos es importante considerar las altas y bajas en el flujo del agua, procesos de inundación y sequía, hidroperiodo, variación en el régimen térmico, aportes y salidas de sedimentos y aportes de materia orgánica de la vegetación ribereña.

Nivel 3. Aquí deben considerarse variables que cambian a menores escalas de tiempo (por ejemplo patrones de variación mensual o diaria) de algunos de los factores considerados en el nivel 2, así como variables relevantes para entender procesos a mayor escala espacial. En el mar esto incluye, por ejemplo, la presión parcial de bióxido de carbono, el intercambio de calor océano-atmósfera, el ciclo microbiano, y la materia orgánica particulada, entre otras variables. En ríos y ambientes estuarinos pueden considerarse aspectos más finos de la química del agua y su variación temporal, tales como materiales inorgánicos y orgánicos en suspensión o disueltos, iones y nutrientes disueltos, “firmas” isotópicas de la materia orgánica, gases y trazas de metales. El monitoreo de estas variables está estrechamente relacionado con el monitoreo de flujos de energía y materiales.

4.3.3. *Sustrato y suelos*

Tanto el suelo en los ambientes terrestres como los fondos y sedimentos en los acuáticos (denominado “sustrato” a continuación), son componentes críticos de los ecosistemas, ya que

en ellos tienen lugar etapas importantes de los flujos de materia y energía. Ejemplos de esto son la descomposición y mineralización de los compuestos orgánicos, la liberación de nutrientes por la intemperización, la formación de minerales secundarios y la captura de nutrientes por las plantas (Allan, 1995; Likens & Borman, 1995). El sustrato representa un almacén de varios de los nutrientes que circulan en el ecosistema; por ejemplo a nivel global, el suelo tiene una capacidad de almacenar carbono 2.7 veces más alta que la de la vegetación (Schlesinger, 1997), y la mayor parte del agua que requieren las plantas vasculares la obtienen principalmente del suelo (Waring & Schlesinger, 1985). Por lo tanto, el entendimiento de los procesos que se dan en el suelo es fundamental para explicar el funcionamiento de los sistemas ecológicos. Los ciclos biogeoquímicos sedimentarios están fuertemente influenciados por procesos hidrológicos que incluyen la deposición de minerales y la materia orgánica (Likens & Borman, 1995), de modo que cualquier cambio en la hidrología local o regional puede tener una influencia determinante en el funcionamiento de los sedimentos como fuente, sumidero o transformador de nutrientes. Los procesos de erosión y sedimentación son muy importantes en las interfases entre ecosistemas terrestres y acuáticos y entre los ecosistemas costeros y marinos (Swank & Crossley, 1988; Allan, 1995; Likens & Bormann, 1995; Mann & Lazier, 2000; Cahoon, 2006). En este sentido, la caracterización del sustrato y el monitoreo de los procesos que ocurren en éste es indispensable para cubrir los objetivos de varias de las áreas temáticas de investigación ecológica a largo plazo.

Nivel básico. La información básica se refiere aquellos aspectos asociados al sustrato que permiten describir sus características generales, dando criterios para realizar los diseños de los muestreos posteriores. Estos aspectos se determinan en una sola ocasión o en caso de ocurrir cambios mayores. Tal es el caso de la estructura del relieve y la generación de mapas topográficos (curvas de nivel, red de drenaje y rasgos orográficos; modelos digitales de elevación del terreno), geológicos (litología superficial), edafológicos (tipos de suelos) y geomorfológicos (formas del relieve), a escalas de representación

cartográfica 1:250,000 o 1:50,000, o de mayor resolución si es posible. En el medio acuático deben describirse aspectos como la dimensión y forma del embalse o cuerpo de agua, la forma de la línea de costa, el curso de ríos y arroyos y el patrón de drenaje superficial, la forma y perfil de los márgenes o costas y su pendiente, la batimetría (a través de mapas cuya escala dependerá tanto del tamaño del cuerpo de agua como de la finalidad de los estudios), y los tipos de sustrato presentes (rocoso, de cantos rodados, arenoso, limoso, etcétera).

Nivel 1. En este nivel se encuentra el estudio del componente estructural del sustrato, sus atributos físicos y químicos. Generalmente, cambian muy poco en el tiempo o lo hacen lentamente (aunque algunos ambientes pueden ser más dinámicos que otros en cuanto a procesos geomorfológicos, como es el caso de los estuarios, los ríos o las zonas montañosas), por lo que no es necesario darles un seguimiento continuo, sino periódico. Entre estos componentes estructurales a evaluar se encuentran la taxonomía del suelo a nivel de suborden, profundidad, densidad aparente, clase textural, capacidad de retención de agua, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, pH, y potencial redox del sedimento.

Nivel 2. Este nivel corresponde también al componente estructural descrito anteriormente, pero incluye variables que sí tienen cambios en tiempos cortos y que sólo es posible caracterizarlos o detectarlos con estudios a largo plazo. Estas variables deben ser monitoreadas con base en patrones anuales o bianuales, dependiendo de las características del ecosistema. Entre estas últimas variables tenemos: contenido de formas totales de nutrientes a través del perfil del suelo (principalmente C, N, P y cationes intercambiables); contenidos de humedad del suelo; curvas de infiltración y humedad del suelo; salinidad del sedimento, concentración de ácido sulfhídrico, conductibilidad hidráulica del suelo; biomasa radical y presencia de agregados estables en agua. Es conveniente contar con mapas de las principales características estructurales del suelo a escala de 1:5,000 a 1:10,000.

Nivel 3. Este nivel corresponde a variables dinámicas que cambian continuamente de ma-

nera temporal, por lo que es necesario darles un seguimiento más detallado. Estas variables se refieren a las formas activas de nutrientes y por lo tanto sólo son interpretables en el contexto del componente estructural (niveles 1 y 2). Algunas de estas variables son la dinámica del agua en el perfil del sustrato; las formas disponibles y microbianas de nutrientes como NO_3 , NH_4 y ortofosfatos; los principales grupo funcionales microbianos; la dinámica de la materia orgánica particulada (MOP); la dinámica de la producción de raíces finas; el tipo de arcillas presentes en el sustrato; las tasas de lixiviación de nutrientes del sustrato, la tasa de erosión y la tasa de sedimentación (por ejemplo en humedales). El monitoreo de estas variables está estrechamente relacionado con el monitoreo de flujos de energía y materiales.

4.3.4. Flujos de energía y materia

Los flujos de energía y materiales son aspectos centrales de la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas, y constituyen importantes indicadores del estado en que éstos se encuentran. Además, muchos de los impactos de las actividades humanas se reflejan en cambios en la dinámica de los flujos de la materia. Es por ello que la incorporación de un monitoreo a largo plazo de estos flujos es fundamental en todos los sitios de la red.

Nivel básico. Las cuencas hidrográficas tienen límites bien definidos en sus parteaguas; su topografía determina que el agua drene a un punto común (la salida de la cuenca) y su estructura jerárquica topológica permite subdividirlas fácilmente en subcuencas. Por lo tanto, utilizar cuencas hidrográficas como unidades de monitoreo constituye una herramienta metodológica muy útil para medir flujos de entrada y salida del ecosistema (Bormann & Likens, 1979). Dado lo anterior, el nivel básico de monitoreo lo constituye un descripción de la hidrografía del sitio, la cual debe incluir aspectos tales como mapas topográficos (escala 1:50,000 con curvas de nivel cada 20 m o de mayor resolución), delimitación de cuencas y subcuencas, cálculo de sus áreas totales, inclinación de las pendientes, geomorfología, exposición, patrones de drenaje, longitud de

los cauces y tipos de cauces (permanentes, estacionales, intermitentes). Es conveniente contar con información sobre la litología superficial a partir de mapas geológicos, dada la influencia de la roca en el drenaje. En el caso de cuerpos de agua continentales, se toman las equivalentes (por ejemplo profundidad, en lugar de pendientes). Para el ambiente marino y costero es mucho más complicado, por lo que se tienen que delimitar fronteras como isobatas y rasgos fisiográficos o geomorfológicos.

Nivel 1. Las entradas y salidas más importantes de materiales en los ecosistemas terrestres se realizan acarreadas por el agua de lluvia o la escorrentía; en ecosistemas acuáticos por el flujo de las corrientes, las mareas y la magnitud de las descargas de los ríos, así como por flujos subterráneos en las zonas costeras y epicontinentales. Es por ello que el monitoreo de la cantidad, calidad y temporalidad de las entradas y salidas de agua debe iniciarse lo antes posible. Un primer nivel de monitoreo deberá incluir: la cantidad e intensidad de la lluvia, mediante el establecimiento de una red de pluviógrafos cuya cantidad y distribución dependerá de la extensión del sitio y la topografía, y los gastos de las principales cuencas hidrográficas del sitio; para el caso de ecosistemas costeros se recomienda el registro del nivel de la marea. Análogamente, en el ambiente marino las corrientes —ya sean inducidas por el viento, gradientes de densidad o por mareas— acarrearán materiales y organismos. El registro continuo de temperatura del mar, mediante la instalación de termógrafos, permitirá detectar variaciones locales y regionales.

Nivel 2. Un segundo nivel de monitoreo deberá contemplar el análisis de la calidad del agua de lluvia y de escorrentía, lo que permitirá cuantificar las entradas y salidas de agua y elementos minerales del ecosistema. Este análisis incluye los siguientes componentes: materia orgánica en forma de partículas, partículas inorgánicas (polvos en el caso de la lluvia y sedimentos en el caso de la escorrentía), concentración de amonio, nitratos, fosfatos, calcio, potasio y pH en agua de lluvia y de escorrentía y ríos, así como carbono, nitrógeno, fósforo, calcio, potasio y magnesio totales de las muestras de sustratos y materia orgánica que salen por escorrentía o por intercam-

bio de la marea. Lo propio aplica en el medio marino, sin bien los nutrientes pueden limitarse a carbonatos, nitratos y fosfatos.

Nivel 3. Lo que se esperaría a más largo plazo es contar con balances detallados de agua, energía y nutrientes del ecosistema. Para lograr esto, es necesario incorporar los siguientes aspectos al monitoreo: pérdidas de agua por evapotranspiración e infiltración profunda; entrada de nutrientes por intemperismo del material parental; entradas de nitrógeno por fijación microbiana; pérdidas de nitrógeno por desnitrificación y captura y pérdida de carbono por la vegetación. En el medio marino también deben evaluarse la entrada y salida de biomasa, así como tasas de crecimiento, mortalidad e interacciones tróficas. Estos son los parámetros de entrada de modelos de balance de masas.

4.3.5. Biodiversidad y poblaciones

Este componente del monitoreo está ligado al área temática tres; tiene por objeto dar seguimiento a largo plazo a los cambios en la composición de especies y la estructura de las comunidades, así como a la dinámica de poblaciones de especies de interés particular (especies clave, especies indicadoras, especies que representan un recurso natural, que son de interés para la conservación por razones ecológicas, económicas o culturales, o bien que son utilizadas como modelo para estudiar ciertos procesos).

La estimación de la biodiversidad y la evaluación de las poblaciones como respuesta a cambios naturales o inducidos del ecosistema, es primordial para comprender la capacidad de resistencia y funcionalidad de los ecosistemas. El ensamble de especie y la dominancia de las mismas refleja el impacto de la perturbación sobre los procesos ecosistémicos, ya que ello se manifiesta no sólo por recambios o pérdida en la riqueza de especies; se expresa igualmente por oscilaciones en la uniformidad o dominancia, por lo cual el seguimiento de estos parámetros como índices de respuesta de los ecosistemas a cambios paulatinos o inmediatos es fundamental.

Nivel básico. La base para el estudio y monitoreo de la diversidad biológica son los inventarios de especies. En este sentido, el nivel mínimo con

el que deberá contar un sitio son listados de especies o inventarios selectos de, por lo menos, algunos grupos de las plantas vasculares y vertebrados más representativos del sitio o la región, resumidos en bases de datos que identifiquen si las especies son endémicas de México, si se encuentran catalogadas en algún grado de vulnerabilidad a la extinción o son de importancia económica. En el medio marino también se deberá contar con inventarios de la ictiofauna y macroinvertebrados. Es deseable que los grupos de investigación cuenten con colecciones de referencia.

Nivel 1. En este nivel es deseable tener inventarios más completos de flora y fauna, incluyendo a todas las plantas vasculares y vertebrados. Esta información deberá estar resumida en una base de datos de las características mencionadas en el apartado anterior. Asimismo, es necesario contar con inventarios, con una base espacio-área, de todas las plantas perennes (una vez al año) y de pequeños mamíferos en sitios representativos (dos veces por año: durante la estación de lluvias y secas). Lo mismo aplica para su equivalente en el medio acuático.

Nivel 2. El segundo nivel de monitoreo requiere de inventarios de plantas vasculares, vertebrados y grupos funcionales de artrópodos, microorganismos y criptógamas. Se espera que se haga un monitoreo de especies clave selectas de diferentes niveles tróficos, en sitios representativos dos veces al año: durante la estación seca y la lluviosa. Es necesario determinar la abundancia relativa de especies de grupos funcionales importantes de acuerdo con las características del sitio, e identificar a las especies clave en términos de su contribución en biomasa y estado de conservación de las poblaciones. Análogamente en el medio costero y marino, así como en cuerpos de agua epicontinentales.

Nivel 3. En el mayor nivel de monitoreo se espera contar con inventarios de grupos selectos de acuerdo a las características del sitio, con especial énfasis en la dinámica poblacional de las especies clave en diferentes niveles tróficos o grupos funcionales, así como procesos e interacciones a nivel de las comunidades bióticas.

4.3.6. Productividad primaria

La productividad primaria neta (PPN) es una variable ecológica fundamental no sólo porque es una medida de la entrada de energía y asimilación de CO₂ en la biosfera, sino porque también es un importante indicador de la condición de los ecosistemas y del estatus de un amplio rango de procesos ecológicos. La medición de las variables relacionadas con el proceso y control de la productividad primaria del ecosistema en cualquier sitio, requiere de un programa de trabajo a largo plazo que incluye distintos niveles de integración. Cada nivel representa grados de conocimiento o información que es necesario alcanzar para ir avanzando en el entendimiento y correcta interpretación de la dinámica del ecosistema. En el caso de la productividad primaria neta, las mediciones no sólo se deben realizar en una base anual, sino también considerar las fluctuaciones espacio-temporales a diferentes escalas y explorar más adelante los factores que dinámicamente la controlan y regulan. Bajo este esquema, el programa de trabajo debe entonces contemplar las etapas o niveles de información que se describen a continuación.

Nivel básico. El nivel más básico de monitoreo de la productividad primaria lo constituye un estudio de la estructura de las comunidades de productores primarios, esto es, la vegetación en medios terrestres y el fitoplancton en medios acuáticos. Este debe incluir la descripción de las comunidades y su composición, basada en una correcta identificación taxonómica de las especies, su abundancia, frecuencia, dominancia y valores de importancia, al menos en los tipos de vegetación o hábitat representativos de la zona de estudio. En sitios terrestres es conveniente contar con mapas actualizados de la cubierta vegetal. En el medio acuático se requiere contar con información de la composición de las principales especies del fitoplancton.

Nivel 1. Una de las primeras actividades por realizar consiste en la selección de los sitios de estudio y la delimitación de áreas permanentes de observación o parcelas en cada sitio, con sus descriptores de tamaño, forma y posición topográfica. El número de parcelas o estaciones de muestreo dependerá del ecosistema y condicio-

nes particulares de cada sitio. Se deberá hacer un muestreo de vegetación en las áreas permanentes de observación y, de ser posible, por ejemplo desde el primer año, iniciar el registro de crecimiento en diámetro de los árboles en los sitios permanentes de observación, así como la producción de hojarasca y los contenidos de mantillo en el suelo. El tipo de cinchos o cinturones para medir incremento en troncos de árboles, así como el tipo y número de trampas de hojarasca dependerá de las condiciones particulares del ecosistema. En ecosistemas acuáticos la medición en la columna de agua (fitoplancton) y macrofitas (como pastos marinos) incluirá la determinación de clorofila y mediciones morfométricas y de área en el caso de vegetación acuática sumergida. En el medio acuático incluye fitoplancton, microalgas, pastos marinos y manglares.

Nivel 2. En una segunda etapa, se deberá asegurar la creación de una base de datos sólida sobre los aspectos más relevantes del proceso de productividad primaria en el ecosistema a nivel local (considerando variaciones del relieve y gradientes en condiciones de sitio) en ecosistemas terrestres o gradientes de salinidad en ecosistemas acuáticos. Además de las variables ya mencionadas (crecimiento en diámetro de plantas leñosas, producción de hojarasca), se deberán incluir estimaciones de las variaciones espaciales y temporales del índice de área foliar, de las tasas de descomposición, de consumo por herbivoría, de producción de raíces finas y de incremento en diámetro de raíces perennes. En el ambiente acuático dependerá básicamente del cuerpo de agua que se esté estudiando y sus características específicas.

Nivel 3. Una última etapa consiste en el análisis de los cambios de la productividad primaria neta a nivel regional (variaciones a escala del paisaje), el cual debe ser abordado con técnicas de sensores remotos y la incorporación de los datos de campo específicos, tal como estimaciones de biomasa aérea e índices de área foliar. Fotografías aéreas de alta resolución e imágenes de satélite se usan y combinan entre sí para examinar los cambios de vegetación a nivel del paisaje. En el medio marino también se estima la productividad por medio de sensores remotos,

ya que el color del océano y aguas costeras está correlacionado con la concentración de pigmentos fotosintéticos.

4.3.7. *Dinámica del paisaje y uso del suelo*

Desde el punto de vista geográfico y ecológico, el paisaje está constituido por el conjunto de elementos observables del territorio, tales como la cobertura vegetal, forma del relieve, afloramientos rocosos, cuerpos de agua, patrones de la red hidrológica y otros elementos transformados, cultivados o construidos por los seres humanos (González-Bernáldez, 1980; Naveh & Lieberman, 1990; Huggett, 1995; Bailey, 1996). El paisaje es el conjunto de elementos o atributos observables en el terreno, a simple vista o a través de medios de percepción remota como fotografías aéreas o imágenes de satélite. La caracterización de tales elementos observables o “fenosistema” (*sensu* González-Bernáldez, 1980) y la interpretación de sus patrones, relaciones y cambios espacio-temporales, permite hacer inferencias acerca de procesos subyacentes, de más difícil observación (“criptosistema”), tales como la dinámica geomorfológica, la formación de suelos, la distribución de la vegetación a través de gradientes ambientales, la distribución potencial de especies de plantas y animales, e incluso la influencia de la historia del uso humano del territorio sobre los patrones y procesos de los ecosistemas.

El análisis geocológico del territorio es una herramienta con múltiples aplicaciones tanto en la investigación como en la gestión ambiental y el manejo de los recursos naturales (González-Bernáldez, 1980; Naveh & Lieberman, 1990). Además de aportar información de contexto para estudios ecológicos, y de ser en sí un campo de la investigación ecológica (Urban *et al.*, 1987; Turner, 1989; Huggett, 1995), es utilizado para el diseño de políticas de uso del suelo y estudios de ordenamiento territorial, evaluaciones de impacto ambiental, selección de áreas para la conservación biológica, planificación del manejo forestal y la agricultura, planificación regional y urbana, etc. (González-Bernáldez, 1980; Mather, 1999; Scott & Csuti, 1996; Velázquez & Bocco, 2001; Jardel *et al.*, 2004a, 2004b).

La transformación del paisaje, como consecuencia de las actividades humanas, es un proceso que no sólo tiene impactos locales y regionales, sino que es uno de los factores más importantes del cambio ambiental global (Turner *et al.*, 1995; Mather, 1999). Los cambios en la cobertura de vegetación (por ejemplo la deforestación y la fragmentación) tienen consecuencias sobre la erosión de los suelos, los procesos hidrológicos y el movimiento de nutrientes en las cuencas, la pérdida de hábitat y biodiversidad, las emisiones de carbono y otros gases de invernadero, y en general, sobre la sustentabilidad de la capacidad productiva del territorio (Murdiyarto & Wasrin, 1995; De Jong *et al.*, 1999; Mander *et al.*, 2000). De igual forma el entendimiento de los procesos sociales subyacentes a los procesos de cambio en el paisaje y el uso del suelo, es fundamental para el diseño y puesta en marcha de políticas y estrategias de gestión del territorio y manejo sustentable de los recursos naturales (Mather, 1999). Los patrones, procesos y dinámica del paisaje son resultado de interacciones entre la sociedad y los ecosistemas (Naveh & Lieberman, 1990). En esta línea de monitoreo se integran los aspectos geográficos, ecológicos y sociales con un enfoque de paisajes.

El estudio y observación de los cambios espacio-temporales en el paisaje es una línea de monitoreo fundamental para la investigación ecológica de largo plazo (Stohlgren, 1995), que se relaciona estrechamente con las distintas áreas temáticas planteadas en este documento. Esta línea de monitoreo se enfoca sobre los siguientes aspectos: a) la caracterización de patrones del paisaje y la observación de su variabilidad espacial y temporal, b) la observación continua de los cambios en la cobertura del suelo y su relación con cambios en el uso del suelo,¹⁷ c) las implicaciones de estos cambios sobre el medio

ambiente y los patrones, procesos y funciones de los ecosistemas, y d) la relación de tales cambios con procesos y causas sociales (económicas, políticas, institucionales o demográficas).

Nivel básico. Se debe contar con información cartográfica básica: mapas temáticos de topografía, litología superficial, suelos, cobertura vegetal y uso del suelo. Descripción general de los elementos del paisaje (relieve y geomorfología, tipos de roca, tipos de suelos, clases o unidades de vegetación, tipos de uso del suelo). Información socioeconómica general (población, actividades económicas, tenencia de la tierra).

Nivel 1. En este nivel es conveniente contar con una descripción más detallada de las características del paisaje, con una caracterización y clasificación de unidades de paisaje y con información acerca de los cambios históricos de cobertura y uso del suelo. Para esto es esencial contar con equipamiento y programas de cómputo especializados para el desarrollo de sistemas de información geográfica con bases de datos integradas y series de mapas temáticos digitalizados. Para considerar los aspectos sociales, es importante contar con mapas catastrales y una caracterización de las condiciones de tenencia de la tierra y régimen de propiedad. El análisis del cambio histórico en la cobertura vegetal es necesario para entender la dinámica y procesos de las áreas de estudio; puede basarse en fotografías aéreas o imágenes de satélite de distintas fechas, al menos con intervalos de 10 años. Complementariamente es necesaria la caracterización de las actividades humanas y usos del suelo.

Nivel 2. En este nivel se debe pasar de la descripción al análisis de las relaciones entre los cambios de cobertura y uso del suelo y los factores sociales (políticos, institucionales, económicos, demográficos) que determinan dichos cambios.

Nivel 3. A un mayor nivel de detalle, se plantea el monitoreo de los factores clave que controlan los cambios en el uso del suelo y la cobertura, así como el desarrollo de modelos sobre la dinámica del paisaje y su relación con procesos sociales.

17. El término *cobertura del suelo* se aplica a los elementos que cubren el terreno, tales como la vegetación natural (bosques, matorrales, pastizales), otros componentes físicos como ríos o lagos, y los componentes producto de la actividad humana (cultivos, obras de infraestructura, edificios, etc.). Con *uso del suelo* se hace referencia al propósito o la forma en que se maneja el terreno y los tipos de cobertura; por ejemplo: producción maderera, ganadería, agricultura, recreación, conservación en áreas protegidas, habitación humana, industria, etc. (Turner *et al.*, 1995). Dada su estrecha relación, los cambios

de cobertura y uso del suelo generalmente se estudian conjuntamente.

4.4. Gestión de la información

Un componente fundamental en la investigación ecológica a largo plazo es la organización, sistematización y conservación de la información generada en los estudios realizados en las áreas temáticas y las líneas de monitoreo (Equihua & López, 2008). El intercambio de información y la colaboración entre grupos y redes es parte esencial del enfoque de la investigación ecológica a largo plazo.

Generalmente el proceso de un proyecto de investigación convencional se considera terminado con la publicación de resultados. En contraste, la investigación ecológica a largo plazo considera que los datos son un activo permanente que se construye por el colectivo de participantes en las redes (Equihua & López, 2008). Es importante tomar en cuenta que los datos son perecederos: las publicaciones incluyen solamente la síntesis de resultados, las bases de datos pueden conservarse o perderse, y además mucha información útil para saber cómo fueron generados y para interpretarlos queda en las notas o en la memoria de los investigadores y desaparece con el tiempo. Dada la complejidad de los fenómenos ecológicos y la necesidad de observarlos a escalas temporales y espaciales amplias, el monitoreo y el registro de información deben hacerse en forma sistemática, asegurando que los datos se conserven en un formato y con un soporte no perecederos; además, debe existir información adicional que permita que usuarios independientes puedan utilizar la información. Esto es, las bases de información sistematizada deben contar con sus *metadatos* (Equihua & López, 2008).

La construcción de un sistema de metadatos es un aspecto fundamental para la investigación ecológica a largo plazo. Este sistema permite conocer qué tipo de información está disponible en los diferentes sitios de estudio y facilitar la comparación de datos y resultados, así como la colaboración entre diferentes grupos y redes nacionales o internacionales. El metadato de un proyecto de largo plazo incluye 14 campos: 1. El título que identifica al juego de datos, 2. Palabras

clave que los describen, 3. El listado de las variables monitoreadas (asociadas o independientes), 4. Los autores de los datos y la información para contactarlos, 5. La cobertura taxonómica si el seguimiento se realiza sobre especies o grupos taxonómicos determinados, 6. La descripción del sitio o sitios donde se lleva a cabo el monitoreo, incluyendo la localización geográfica y extensión del área, 7. El tipo o tipos de ecosistemas, las condiciones físico-geográficas, ecológicas, los rasgos socioeconómicos y otra información del contexto ambiental que se considere relevante, 8. El contexto del monitoreo explicando por qué se lleva a cabo, 9. La descripción de los métodos de muestreo, 10. El tipo de instrumental o equipo utilizado, 11. La temporalidad del muestreo (cada cuando se realiza), 12. La cobertura espacial del monitoreo (cuál es el área que cubre), 13. El año de inicio de los muestreos, y 14. La discontinuidad en el registro de datos (en caso de que existan periodos sin registros por alguna razón) (Equihua & López, 2008).

La documentación de los metadatos implica un esfuerzo adicional en la rutina de investigación (Equihua & López, 2008), pero facilita a la larga la conservación de la información generada y su utilización. La cooperación entre investigadores a través de grupos de trabajo y redes, y la existencia de bases de datos de largos periodos de tiempo, que sirven para nuevas investigaciones o proporcionan información de contexto, permiten avances significativos y aumentan la productividad de la investigación, como ha quedado demostrado por los resultados obtenidos en muchos sitios de las redes de investigación ecológica (Golley, 1993).

Una parte importante del trabajo que se realiza en la Red MEX-LTER es crear una estructura común para que todos los investigadores y grupos de investigación puedan crear bases de datos que se mantengan a largo plazo con un soporte adecuado y que permitan el intercambio de información y la colaboración eficaz. Esto requiere, desde luego, una cultura de colaboración y cooperación en red, así como una enorme convicción de la importancia de realizar investigación con este enfoque (Equihua & López, 2008).

Grupos y sitios de trabajo de la Red MEX-LTER

En esta sección se hace una descripción general de los once grupos de trabajo que conforman la Red MEX-LTER (en marzo de 2011) y de sus sitios de estudio, incluyendo sus antecedentes y líneas de investigación. Al final se describen también los estudios que están realizando los integrantes de la Red en la categoría de individuos.

5.1. Alchichica

5.1.1. Antecedentes

El inicio formal de actividades de este grupo tiene su origen a principios de 1998, cuando se inició un programa de monitoreo regular en el Lago de Alchichica, en la porción semiárida de la Cuenca Oriental en el estado de Puebla. En la cuenca se encuentra una importante reserva de agua subterránea y se localizan varios lagos con características muy particulares, que los hacen de gran interés desde el punto de vista científico. Seis de estos cuerpos de agua se formaron por eventos volcánicos y son “lagos-cráter” (Alchichica, Atexcac, Quechulac, La Preciosa o Las Minas, Aljojuca y Tecuitlapa), denominados en náhuatl *axalpazacos*, “vasijas llenas de agua”. Se encuentran también dos “lagos-playa”, Laguna del Carmen o Totolcingo y Laguna El Salado o

Tepeyehualco, actualmente llanuras que eventualmente se inundan en la temporada lluviosa.

El Lago de Alchichica ha sido el principal sitio de estudio del grupo, integrado por 16 especialistas en distintas disciplinas como limnología, biología, química, hidrología, climatología, física acuática y ciencias sociales. La información disponible de estudios previos en el lago permitió a los investigadores intuir la existencia de ciclos hidrodinámicos que se manifiestan con gran regularidad. A partir de 1998 se ha ido incorporando el monitoreo regular de nuevas variables e instalado nuevos registradores, depurando los aspectos metodológicos.

El grupo se formó con la creación del Proyecto de Conservación y Mejoramiento del Ambiente (CyMA) de la División de Investigación de la otrora Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), ahora Facultad de Estudios Superiores (FES). Dentro del proyecto CyMA, un grupo de profesores con interés común en el estudio de los cuerpos acuáticos epicontinentales conformaron el Laboratorio de Limnología. Tras varios años de desarrollo y superación académica, así como una decisiva contribución para formar el Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (50% de los tutores de limnología son de la FES Iztacala), el Consejo Técnico de la Facultad aprobó en 2002 la creación del Proyecto de Investigación en Limnolo-

gía Tropical (PILT), en reconocimiento de la clara línea de investigación desarrollada por los limnólogos tanto del proyecto CyMA como de otros laboratorios de la institución.

Independientemente de la colaboración con otras dependencias de la UNAM, como el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), el Instituto de Biología (IBUNAM), o la Facultad de Ciencias, así como de otras instituciones de educación superior como la Universidad de Guadalajara y la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, diversos académicos del grupo mantienen comunicación con investigadores de universidades extranjeras (de la Gran Bretaña, Estados Unidos, Australia, España y República Checa, entre otros países). Aunque no cuentan con programas específicos de colaboración, los intercambios de académicos y estudiantes se han llevado a cabo en el marco de programas de apoyos a proyectos de investigación (DGAPA, Conacyt, Comunidad Europea), institucionales (por ejemplo de la Dirección General de Intercambio Académico) y gubernamentales (México-Consejo Británico, México-Academia de Ciencias de la República Checa). Cabe mencionar que los integrantes del grupo se encuentran en posiciones de relevancia para el desarrollo de la limnología en el país, como son la Coordinación del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM y la presidencia y vicepresidencia de la Asociación Mexicana de Limnología AC.

El grupo fue originalmente integrado con el objetivo de desarrollar la limnología mexicana y con esto contribuir al entendimiento de la limnología tropical, con el fin de reconocer la estructura y función de nuestros ecosistemas acuáticos epicontinentales, lo cual permitirá diseñar programas para su conservación, uso sustentable y, en su caso, rehabilitación. Por lo anterior, es claro que el grupo no fue conformado especialmente para su integración a la red. Sin embargo, desde hace aproximadamente un par de años, algunos miembros nos enteramos de la existencia de la Red MEX-LTER y nos propusimos trabajar con vistas a formar parte de la misma. La convocatoria por parte del Comité de Creación de la Red MEX-LTER constituyó una excelente oportunidad en este sentido.

5.1.2. Sitio de trabajo

El Lago Alchichica localizado entre los 19°24'N y 97°24'O, a una elevación de 2,300 m sobre el nivel del mar, es el objeto central de estudio del grupo. Es un lago profundo (62 m), de aguas salobres, con características muy particulares e interesantes desde los puntos de vista ambiental, biológico y científico. En este lago habitan organismos acuáticos endémicos como el ajolote *Ambystoma tayloris* y el charal *Poblana alchichica*. Se encuentran también rocas calizas, llamadas tufas, en las que viven organismos microscópicos que contribuyen a su formación y que son de interés para la ciencia porque representan un ambiente similar al que probablemente debió existir al originarse las primeras formas de vida.

Algunos trabajos se han desarrollado a escala de la cuenca y en otros de los lagos y lagunas que se encuentran en ésta y, a mediano plazo, existe el interés de ampliar los estudios a toda el área, vinculándolos con los aspectos de conservación, manejo de los recursos y desarrollo social en el área, incluyendo el análisis de la interacción sociedad-lago.

En cuanto a las facilidades para la investigación en el área, existe el potencial para poder establecer una estación de campo, lo cual está en proyecto. Alchichica se localiza a 109 km al noroeste de la ciudad de Puebla. Para llegar a este lago se toma la carretera 150 desde la capital y luego la desviación localizada a la altura del poblado de Acatzingo, siguiendo por la ruta número 140 (Tepeaca-Perote) hasta San José Alchichica, pasando el poblado de Oriental. La ciudad más grande en las cercanías, Perote, se encuentra a escasos 17 km de Alchichica, dispone de hoteles, restaurantes, hospitales, bancos, tiendas, servicio de correo electrónico, escuelas, en fin, todo lo necesario para desarrollar una amplia gama de actividades académicas y sociales.

A pesar de no contar con una estación de campo en el Lago Alchichica, hemos establecido un arreglo de colaboración —que data de hace varios años— con algunos lugareños asentados en la ribera del lago, de forma que hemos construido un pequeño almacén y laboratorio que cuenta con luz y agua corriente; en éste se

guardan en forma segura materiales y equipo. Incluso, dos embarcaciones que se utilizan para el muestreo. Así mismo, hemos colocado dos estaciones meteorológicas en la ribera del lago.

5.1.3. Líneas de investigación

Los objetivos del Grupo Alchichica se han centrado en el registro e interpretación de los cambios a largo plazo en el ecosistema lacustre, buscando el entendimiento de las interacciones entre los procesos físicos, químicos y biológicos y su dinámica, integrando el estudio de procesos atmosféricos, hidrológicos y biológicos.

Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. Desde el año 1998 la investigación en esta área se ha centrado en la medición de algunos indicadores de la producción primaria del cuerpo de agua, tales como la concentración y distribución de la clorofila "a" total y por fracciones de talla en la columna de agua, variación de la radiación fotosintéticamente activa disponible en las diferentes profundidades y estimación de la variación de la productividad primaria en la vertical mediante algoritmos matemáticos. El objetivo a largo plazo en esta área consiste en tener una medida adecuada de la productividad general del cuerpo de agua y los mecanismos que la regulan. Información de los resultados obtenidos se presenta en Alcocer *et al.* (2000), Oliva *et al.* (2001) y Adame *et al.* (2008).

Patrones y control de la dinámica del agua, carbón y nutrientes en los ecosistemas. Esta área temática tiene como objetivo llegar a realizar el balance de los nutrientes del lago Alchichica, así como reconocer la posible existencia de patrones recurrentes en espacio y tiempo. Adicionalmente, se pretende reconocer las principales relaciones que éstos patrones, por ejemplo nutrientes limitantes, tienen con las comunidades bióticas, especialmente con los productores primarios (Falcón *et al.*, 2002; Ramírez-Olvera *et al.*, 2008; Ramos-Higuera *et al.*, 2008). En este tema se han publicado los trabajos de Alcocer *et al.* (2000) sobre la hidrodinámica anual del lago y sus posibles efectos en la concentración de nutrientes para los productores primarios, la dinámica del carbono particulado en el lago (Alcocer *et al.*, 2007) y el trabajo de Escobar *et al.* (1998)

que presenta datos básicos de las relaciones tróficas más importantes entre la región limnética y la zona litoral del cuerpo de agua.

El papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Desde 1998 se ha evaluado mensualmente la variación en las densidades de organismos del plancton (bacterioplancton, fitoplancton de red y zooplancton) en la columna de agua. La presente área temática tiene como objetivo de largo plazo conocer, de la manera más completa posible, las diferentes especies de organismos que habitan en el lago Alchichica, así como las principales relaciones bióticas y abióticas que existen en el sistema y de qué forma se interconectan. En lo anterior está incluido obtener información de calidad para evaluar las condiciones de las poblaciones de organismos que únicamente habitan en el lago y que por este hecho tienen un mayor riesgo de desaparecer. Se han descrito y estudiado especies endémicas para el lago como un crustáceo isópodo (Escobar & Alcocer, 2002; Alcocer & Escobar, 2007) y un alga diatomea (Oliva *et al.*, 2006). También se han desarrollado estudios ecológicos de diversos componentes bióticos del sistema, como las bacterias heterótrofas del plancton (Lugo *et al.*, 2000), el fitoplancton (Oliva *et al.*, 2001), el zooplancton (Lugo *et al.*, 1999) y el bentos litoral (Alcocer *et al.*, 1993; Alcocer *et al.*, 1998; Peralta *et al.*, 2002).

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. La investigación en esta área temática tiene como objetivo llegar a reconocer si existen patrones meteorológico-climáticos a diferentes escalas (anual, decadal) que permitan distinguir la presencia y efecto de perturbaciones. Esta área se encuentra en sus inicios, por lo que los trabajos en ella son incipientes, como el de Alcocer y Lugo (2003), Alcocer y Filonov (2007) y Filonov y Alcocer (2002). Otros trabajos han abordado la problemática del agua en la cuenca oriental (Alcocer *et al.*, 2004).

Efecto del cambio climático en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Se ha observado que durante el Holoceno tardío las condiciones químicas básicas de Alchichica no parecen haber mostrado cambios (acumulación de tufas y registro de diatomeas con afinidad salina semejantes a las presentes); sin embargo,

es posible que se esté registrando actualmente un cambio en la alcalinidad (mayor cantidad de carbonatos en relación con los bicarbonatos y, por lo tanto, en la tasa de sedimentación de precipitados químicos hacia el fondo del lago) que preceda a cambios observables en la salinidad y el pH. Como un antecedente de esta área se han publicado trabajos en donde se presentan algunos datos que sugieren un efecto de El Niño sobre la dinámica del lago de Alchichica (Alcocer y Lugo, 2003), así como sobre indicios de cambio climático a corto plazo indicado por sedimentos del mismo lago (Caballero *et al.*, 2003).

5.2. Arrecifes del Pacífico

5.2.1. Antecedentes

El grupo de investigación sobre arrecifes coralinos del Pacífico mexicano aborda el estudio de los arrecifes coralinos y rocosos desde Baja California hasta Chiapas. Su principal objetivo es conocer y evaluar aspectos estructurales y funcionales de las comunidades coralinas en ambientes rocosos, así como determinar los patrones y procesos ecológicos que los regulan, para proponer estrategias para su conservación y manejo.

Aunque las comunidades de coral del Pacífico mexicano han sido estudiadas desde mediados del siglo XIX (Verrill, 1864), no es sino hasta la década de 1990 que se empiezan a publicar datos sobre la abundancia y diversidad de las especies (Robinson & Thomson, 1992; Reyes-Bonilla, 1993). Hasta 1997 se contaba información publicada sobre la estructura comunitaria coralina en el estado de Nayarit (Carriquiry & Reyes-Bonilla, 1997), Oaxaca (Glynn y Leyte-Morales, 1997) y algunos datos para la localidad de Cabo Pulmo, Baja California Sur (Robinson & Thomson, 1992; Reyes-Bonilla & Calderón-Aguilera, 1994). Sin embargo, mucha de la información se encontraba en documentos de difícil acceso y poca difusión.

La publicación de los resultados de los primeros trabajos en colaboración, a principios de la década de 1990, marca el inicio formal del grupo (Reyes-Bonilla & Calderón-Aguile-

ra, 1994; Reyes-Bonilla & Carriquiry, 1994). La colaboración se fortaleció con el desarrollo de investigaciones en la Península de Baja California y las Islas Revillagigedo (Carriquiry & Reyes-Bonilla, 1997; Reyes-Bonilla & Calderón-Aguilera, 1999), incorporando estudiantes y técnicos que posteriormente se integraron como investigadores en instituciones de Jalisco y Oaxaca, contribuyendo al conocimiento de los arrecifes coralinos en nuevas áreas (López-Pérez & Hernández-Ballesteros, 2004; López-Pérez *et al.*, 2007, 2010). Esto permitió a la agrupación el desarrollo de trabajos más completos, que involucraron más especies y taxa supraespecíficos, y que además pudieron ser conducidos a mayor escala geográfica y temporal (por ejemplo Reyes-Bonilla *et al.*, 2002; 2005).

Durante la última década el grupo ha extendido sus esfuerzos hacia otras zonas del Pacífico, colaborando con investigadores con experiencia en otros grupos taxonómicos y campos del conocimiento (Iglesias-Prieto *et al.*, 2004; Herrero-Pérezrul *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2009; López-Pérez & Budd, 2009). En este momento el grupo tiene la capacidad de abordar problemas muy diversos, desde aspectos básicos sobre descripción de las comunidades de peces e invertebrados y modelación de sistemas complejos, hasta temas fisiológicos y geoquímicos ligados al estudio del cambio global (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007).

El Grupo Arrecifes ha alcanzado reconocimiento como una de las asociaciones de investigación interinstitucional en ciencias del mar más eficientes y productivas en el Pacífico de México. Sus miembros ocupan puestos ejecutivos tanto en el Consejo Consultivo y Técnico de los Arrecifes Coralinos de México (asesor de Semarnat e INE en éste ámbito) como en la Sociedad Mexicana de Arrecifes Coralinos. Actualmente es el único grupo en la Red MEX-LTER que estudia la estructura y función de arrecifes coralinos del país, un ecosistema de gran relevancia ecológica y económica por su alta biodiversidad y por los servicios ambientales que presta, tales como protección de la línea de costa, zona de refugio y alimentación de varias especies de importancia comercial y atractivos turísticos para la práctica del buceo, entre otros. Todos sus miembros son

investigadores de las principales instituciones académicas asentadas en el litoral del Pacífico mexicano: el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y el Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California en Ensenada, la Universidad Autónoma de Baja California Sur y el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del Instituto Politécnico Nacional en La Paz, Baja California Sur, el Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara en Puerto Vallarta, Jalisco y el Instituto de Recursos de la Universidad del Mar, en Puerto Ángel, Oaxaca. Esto permite tener mayor acceso a las localidades de estudio y generar información mediante las mismas técnicas y metodologías.

5.2.2. Sitios de trabajo

Aunque a diferencia del mar Caribe, la costa occidental de México no es un sitio favorable para los corales (la plataforma continental es estrecha, las aguas son frías, poco claras y ricas en nutrientes debido a las surgencias y pH bajo) en esta región existen comunidades coralinas importantes e interesantes por sus características particulares.

El Grupo Arrecifes trabaja en cuatro regiones principalmente: el sur del Golfo de California (entre La Paz y Cabo Pulmo), las Islas Revillagigedo (en especial Isla Socorro), Bahía de Banderas y Bahías de Huatulco. La selección de lugares se hizo con base en su accesibilidad para el personal que forma el grupo, cuyas instituciones están localizadas en las ciudades de La Paz, Puerto Vallarta y Puerto Ángel. En todos los casos se cuenta con amplias facilidades logísticas (laboratorios, laboratorios húmedos, equipo experimental y de campo) espacios en las universidades y con material y equipo de campo. Los sitios principales de estudio se describen a continuación.

Cabo Pulmo, en Baja California Sur (23°25' N, 109°25' O), es un arrecife con una extensión aproximada de 150 ha; está enclavado en una bahía, la cual es una continuación de la planicie costera que se extiende hacia tierra dentro. El piso cercano a la costa es principalmente gra-

nítico, pero pueden encontrarse secciones de arenisca bien consolidada, constituida por arenas de grano grueso y cuarzo cementados por carbonato de calcio. La profundidad aumenta en forma gradual hasta aproximadamente un kilómetro de distancia de la playa, donde aparece una pared con caída de entre 2 y 5 m. Esta sección del arrecife es conocida como "Los Cantiles" y su pared presenta cuevas y salientes con una gran diversidad animal. La base de la pared es totalmente arenosa. A una distancia menor a 3 km de la playa, la profundidad es superior a los 500 m porque la bahía está situada en una zona donde la plataforma continental es casi inexistente. Cabo Pulmo tiene el carácter de Parque Nacional.

Bahía de Banderas (20°28' N, 105°36' O) es la bahía más grande de México; tiene 40 km de ancho entre su extremo norte (Punta Mita) y el sur (Cabo Corrientes) y se ubica en la provincia norte del Pacífico Oriental Tropical. Su porción norte pertenece a Nayarit y la sur a Jalisco. Es una zona de transición y convergencia de las corrientes oceanográficas de California y Norecuatorial. Está conformada por varias subcuencas que la rodean y una parte de la cuenca del Río Ameca, las cuales vierten sus aguas a la bahía. Al sureste está rodeada de montañas con altura máxima de 1,500 m; al norte existen lomas con elevaciones que van de 500 a 700 m. Entre éstas fluye el río Ameca, que es el más grande de la región, generando un valle de alrededor de 15 km de ancho, el cual desemboca a unos 10 km al norte de la ciudad de Puerto Vallarta. Aquí se reconocen comunidades arrecifales en las Islas Marietas, que tienen carácter de Parque Nacional.

Al sur de Jalisco se encuentra una pequeña playa de bolsillo conocida como Tenacatita (19°16' N, 104°52' O), de aproximadamente 2.5 ha. La zona de Tenacatita está limitada al este por el parteaguas de los cerros de la Manzanilla y la propia Bahía de Tenacatita, al oeste por la llanura costera en Tecuán y La Albufera, al norte por los lomeríos de la zona Miguel Hidalgo y Aguacaliente y al sur por el océano Pacífico. Aquí se encuentran rocas intrusivas (granitos y rocas afines) del Mesozoico y Cenozoico.

Bahía de La Entrega (15°44'3"N, 96°07'3"O) en Oaxaca, tiene una extensión de 7.5 ha y forma

parte de la Bahía de Santa Cruz. El litoral tiene playas arenosas y rocosas, éstas últimas compuestas por rocas ígneas intrusivas ácidas con incrustaciones cristalinas; se encuentra adyacente al Parque Nacional Huatulco.

Además de los lugares citados, el grupo lleva a cabo visitas con periodicidad semestral o anual a otros arrecifes rocosos y coralinos en el centro y norte del Golfo de California (de Loreto hasta Bahía de Los Ángeles), Colima y Guerrero. Sin embargo, cabe mencionar que en esos lugares la logística es más compleja, ya que no se cuenta con instituciones colaboradoras o estaciones de campo.

La distribución y abundancia de 67 especies de corales ha sido registrada en 368 localidades referidas geográficamente a lo largo de la costa del Pacífico (Reyes-Bonilla *et al.*, 2005). Sin embargo, las comunidades están dominadas por tres géneros: *Pocillopora*, *Porites* y *Pavona*. A lo largo de dos décadas de monitoreo se ha observado que la cobertura de coral ha descendido, en promedio, de 45% antes del evento de El Niño de 1997-1998 a 25% actualmente; este descenso se atribuye a eventos climáticos como El Niño y a ciclones y tormentas. Por lo que respecta al primero, la mortalidad causada se manifiesta como “blanqueamiento”. El blanqueamiento de coral es un fenómeno que ha llamado la atención de los investigadores en arrecifes coralinos; antes de los años 1980 era considerado como un evento raro, pero para fines de esa década se había notado un aumento en su frecuencia (Williams & Bunkley-Williams, 1990; Glynn, 1988). El fenómeno recibe su nombre del hecho de que los corales que lo sufren, pierden total o parcialmente su coloración debido a que expulsan sus dinoflagelados simbioses (zooxantelas) o porque éstos pierden sus pigmentos fotosintéticos (Brown, 1997). Aunque se han propuesto varias hipótesis sobre las razones de su ocurrencia, todo indica que el blanqueamiento se presenta en casos donde las zooxantelas sufren daños en el fotosistema II (Iglesias-Prieto *et al.*, 1992; Hoegh-Guldberg, 1999). El daño ocurre a nivel enzimático y puede darse por variadas causas, pero en especial debido a la presencia de temperaturas elevadas. El Niño de 1982-1983, reconocido en su momento como el más fuerte del

siglo xx, impactó severamente las pesquerías del occidente de América (especialmente en Perú), y dejó sentir su influencia tan al norte como la costa de los Estados Unidos (Glynn, 1988). En México, este evento no causó fuertes daños, pero el de 1997-1998 ocasionó mortalidad de corales en Bahía de Banderas de hasta 90% (Reyes-Bonilla *et al.*, 2002).

Los ciclones y tormentas tropicales causan daño físico a los arrecifes coralinos, ya sea por fractura de las formas ramosas, como las del género *Pocillopora*, y enterramiento por acarreo de sedimentos. Según autores como Reaser *et al.* (2000), el incremento en la temperatura global por efecto del cambio climático provocará que los ciclones y tormentas sean más frecuentes e intensos, por lo que los arrecifes coralinos podrían ser negativamente afectados. Por otra parte, a diferencia de lo que ocurre en otras localidades como Panamá, Colombia o las Islas Galápagos, en el Pacífico mexicano la depredación y la bioerosión no afectan el desarrollo de los arrecifes (Reyes-Bonilla & Calderón-Aguilera, 1999).

5.2.3. Líneas de investigación

El grupo está involucrado en cuatro de las áreas temáticas de la Red MEX-LTER, y lleva a cabo estudios detallados enfocados a los siguientes taxa: corales pétreos, erizos de mar, estrellas de mar y peces arrecifales. En algunas zonas se ha analizado las asociaciones de moluscos.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Dentro de esta área temática el objetivo principal es el análisis interanual de la comunidad local de los grupos citados en todas las zonas de trabajo (Reyes-Bonilla & Álvarez-Filip, 2009). Para ello se han llevado a cabo descripciones cuantitativas de la fauna arrecifal en cada región, empleando índices ecológicos tradicionales (Torrejón-Arellano *et al.*, 2008). La periodicidad de visitas ha sido anual o semestral, y se han estudiado todas las zonas al menos durante los últimos ocho años. En segundo lugar, se tiene gran interés en la evaluación de diferentes medidas de la biodiversidad de los grupos taxonómicos mencionados, tratando de diferenciar dos efectos: la temporalidad y el gradiente geográfico latitudinal. Se han utilizado índices de

diversidad funcional, trófica (en el caso de peces) y morfológica de las especies y los resultados se han contrastado con los de la riqueza específica (Reyes-Bonilla *et al.*, 2010). Por último, se ha iniciado el desarrollo de modelos de balances de masa y de flujo de energía para conocer la estructura de las redes alimenticias y la función trófica de los ecosistemas. Una contribución importante del grupo ha sido la elaboración de un atlas de los corales pétreos del Pacífico mexicano (Reyes-Bonilla *et al.*, 2005).

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. Sobre este tema se están analizando las consecuencias de los eventos de gran escala sobre la estructura comunitaria de los citados taxa arrecifales (Reyes-Bonilla *et al.*, 2002). En especial se ha dado mucha atención al reconocimiento de los cambios a nivel de estructura comunitaria causados por la oscilación sureña de El Niño. El interés proviene de que la elevación de temperatura que El Niño trae consigo produce el fenómeno conocido como “blanqueamiento de coral”, el cual afecta ostensiblemente a los corales de maneras muy diversas; por ejemplo, disminuye su tasa de crecimiento y fecundidad, y afecta el metabolismo de sus algas simbiotas (Calderón-Aguilera *et al.*, 2007; Rodríguez-Troncoso *et al.*, 2010a, 2010b). Si los blanqueos duran demasiado tiempo, eventualmente causan mortalidades que pueden ser desde muy ligeras hasta masivas, como ocurrió en México en 1997 (Carriquiry *et al.*, 2001; Reyes-Bonilla *et al.*, 2001). Finalmente se han revisado las consecuencias (o en su caso, su ausencia) resultantes de la caída poblacional de los corales sobre el resto de las especies, evaluando esto bajo la perspectiva de los modelos de redes tróficas.

Efecto del cambio climático en la estructura y función de los ecosistemas. Es la línea de trabajo más reciente que ha iniciado el grupo. La idea es analizar los posibles impactos del cambio global sobre tres aspectos de los arrecifes: la abundancia de especies selectas, la tasa de deposición de carbonato de calcio en un gradiente latitudinal y la conectividad a gran escala (Paz-García *et al.*, 2009; LaJeunesse *et al.*, 2010). En todos los casos los estudios están iniciando, pero la perspectiva de desarrollo es excelente.

Definición de criterios para el manejo y conservación de ecosistemas. En este renglón el grupo ha llevado a cabo diversas actividades en coordinación con autoridades federales y estatales de distintas regiones del Pacífico de México (Lara-Lara *et al.*, 2009). Primeramente, la información disponible de largo plazo ha permitido generar inventarios biológicos muy detallados de las especies presentes en áreas naturales protegidas, donde aparecen arrecifes rocosos o de coral en el Pacífico mexicano (Reyes-Bonilla & López-Pérez, 2009). Asimismo, se ha contribuido en la elaboración de los Programas de Conservación y Manejo de algunas áreas protegidas insulares de la región Pacífico Centro (Conanp, 2007a, 2007b) y se ha utilizado la información para sugerir áreas de conservación prioritarias en el Pacífico sur mexicano (López-Pérez & López-García, 2008). Además, dado que las metodologías de seguimiento utilizadas por el grupo han permanecido durante largo tiempo, se está discutiendo la posibilidad de instituir las en los programas de manejo de los parques, con el fin de que la línea base para el monitoreo pueda extenderse, en algunos casos, a tiempos previos a la instalación misma de los parques. Recientemente, hemos incursionado en analizar el efecto de la intensidad de visitación en las áreas arrecifales de los parques nacionales con el fin de establecer criterios de uso, capacidad de carga turística y límites de cambio aceptable en los Programas de Conservación y Manejo de las áreas. La última parte del estudio consiste en el uso de los registros históricos para determinar niveles mínimos de cambio detectable de las especies dominantes.

5.3. Chamela

5.3.1. Antecedentes

El grupo Chamela de la Red MEX-LTER realiza su investigación en la región de la costa de Jalisco, en México, en donde se ubica la Reserva de la Biosfera Chamela Cuixmala, la cual constituye una de las áreas de bosque tropical seco mejor conservado del planeta. Desde hace 33 años la UNAM, así como otras universidades nacionales

y extranjeras han estado realizando investigación científica en la región. Se trata de una de las zonas del país más estudiadas en términos taxonómicos y ecológicos. Así mismo, desde 1981 se realizan estudios a largo plazo sobre la estructura y funcionamiento del ecosistema incluyendo la medición de los flujos, balances y bancos de agua, energía y nutrientes. El grupo Chamela de la Red MEX-LTER está conformado por 26 investigadores de siete instituciones diferentes. Por parte de la UNAM participan el Instituto de Biología, el Centro de Investigaciones en Ecosistemas, el Instituto de Ecología y el Instituto de Geografía. Además colaboran investigadores del Instituto Nacional de Ecología, de la Fundación Ecológica de Cuixmala y del Centro de Estudios Ambientales de la Universidad Autónoma de Morelos.

5.3.2. Sitio de trabajo

El bosque tropical seco (BTS) tiene una amplia distribución en los trópicos, representa 42% de la vegetación tropical total del mundo (Murphy & Lugo, 1986). En México asciende a 64% de la vegetación tropical de país y es uno de los ecosistemas más fuertemente utilizados y alterados por las actividades humanas. Se estima que sólo 27% del área original cubierta con BTS permanecía intacta a principios de los años noventa. Su área de distribución nacional incluye la costa del Pacífico desde Sonora y el sur de Baja California hasta Chiapas, algunas regiones en el centro y sur del país, incluyendo zonas aisladas en la costa del Atlántico en los estados de Tamaulipas, Veracruz y Yucatán (Rzedowski, 1978).

Chamela se localiza en la costa del Pacífico mexicano en el estado de Jalisco (19°29'N y 105°01'W) dentro de los límites del municipio de la Huerta (Noguera *et al.*, 2002). En esta región, la Estación de Biología de la UNAM contaba inicialmente con una área protegida de BTS de 1,600 ha en 1971, la cual aumentó a 3,319 ha en 1993. Ese mismo año se creó la Reserva de la Biosfera Chamela Cuixmala, con una área de conservación de 13,142 ha a través de la colaboración entre la UNAM y la Fundación Ecológica Cuixmala. La geología y topografía de la región de Chamela pertenece a la provincia fisiográfica

de la Sierra Madre del Sur. La Sierra fue formada a fines del cretácico y durante el periodo Terciario por la subducción de las placas de Norte América y de Cocos (Schaaf, 2002). El relieve predominante en Chamela consiste de lomeríos bajos y con fuerte pendiente sobre rocas volcánicas del Terciario en las que predominan la riolita, el granito y la granodiorita.

Los suelos del BTS de Chamela son relativamente jóvenes, someros (0.5 -1 m de profundidad) e identificados como Entisoles. Están poco estructurados, con una textura de migajón arenoso y con un pH que va entre 5.5 y 6.0 unidades (Cotler *et al.*, 2002).

El clima de Chamela es cálido-subhúmedo con un patrón fuertemente estacional de lluvias de verano. La temperatura del aire promedio anual es de 24.6°C (1978-2000), con pequeñas diferencias entre las temperaturas máximas mensuales (29-31°C), pero con grandes diferencias entre las mínimas mensuales (15-23°C). Los meses más cálidos son de junio a agosto y los más fríos son de enero a marzo. La precipitación promedio anual es de 788 mm (1977-2000) con una gran variación entre años. El año más húmedo durante este periodo fue 1998 (1,261 mm), mientras que el más seco fue 1985 (366 mm). La época de lluvia va de junio a octubre y las tormentas principales son producto de ciclones en el océano Pacífico (García-Oliva *et al.*, 2002).

La Estación de Biología de la UNAM cuenta con infraestructura y seguridad institucionales que facilitan la investigación. Dentro de dicha infraestructura se cuenta con una estación meteorológica con pluviógrafo, psicrómetro, termómetros de máximas y mínimas, heliopirometro, tina de evaporación; dos torres meteorológicas equipadas con radiómetros, psicrómetros, termómetros, y medidores de velocidad y dirección del viento; espacio de laboratorio de unos 40 m², equipado con balanzas, hornos de secado, destilador, mufla, refrigeradores, campana de extracción y potenciómetro; herbario y colecciones de insectos, aves, reptiles y mamíferos; biblioteca con sala de juntas para 20 personas; aula laboratorio para unas 15 personas; servicios de agua de pozo, energía eléctrica, teléfono y conexión a Internet; dormitorios y comedor con capacidad de hospedaje y alimentación para 30

personas; acceso por camino pavimentado a 2 km de la Carretera Barra de Navidad a Puerto Vallarta (km 59) y un sistema de veredas de 10.7 km, y un camino de terracería de acceso a los sitios de medición en las cuencas experimentales. El aeropuerto de Manzanillo está a una hora en automóvil (aproximadamente a 100 km) y el de Puerto Vallarta a 1.5 horas (aproximadamente a 160 km).

5.3.3. Líneas de investigación

Productividad primaria en los ecosistemas. Los aspectos de productividad primaria se están estudiando desde hace más de 20 años en cinco cuencas adyacentes (12-28 ha) de bosque primario en la Estación de Biología Chamela, UNAM (Maass *et al.*, 1994). En 1982 se instalaron parcelas permanentes de estudio de 80 x 30 m, una por cuenca en la porción central y abarcando ambas laderas. En la cuenca 1, considerada como control, se instalaron dos parcelas más, una en la porción superior y otra en la parte baja. Se etiquetaron, identificaron y midieron los diámetros de todos los individuos (>3.0 cm DAP) de cada parcela para el censo de vegetación y seguimiento a largo plazo de los siguientes parámetros: cambios en diámetro basal, reclutamiento y mortalidad de individuos, dominancia y diversidad. Para cuantificar la caída de hojarasca, se instalaron 12 trampas (50 cm de diámetro, 1 m de alto) por ladera. Durante todos los años, las trampas se han vaciado cada mes, y quincenalmente durante las lluvias. El mantillo se ha colectado usando un anillo de 20 cm de diámetro que se posiciona sistemáticamente en el suelo a lo largo de un transecto de 40 m en un área adyacente a cada parcela. Se colectan trimestralmente 12 muestras por ladera y el transecto se desplaza 1 m entre colectas para evitar sobreponer los puntos de muestreo. Esta información fue la base para una estimación de la productividad primaria neta en la cuenca 1 (Martínez-Yrizar *et al.*, 1996).

El estudio de los aspectos de regeneración del bosque es reciente (Proyecto MABOTRO, Martínez-Ramos, 2004). Para ello se seleccionaron 12 parcelas de 20 x 50 m, tres por cada una de las siguientes categorías: pastizales re-

cién abandonados, bosques secundarios de 3-5 años, bosques secundarios de 8-12 años y bosques maduros, todos en condiciones similares de pendiente, exposición y posición en el relieve. Se colocaron al azar 12 trampas de hojarasca (50 cm de diámetro, 1 m de alto) por parcela, que se han colectado mensual y quincenalmente. Se realizaron censos de la vegetación (herbáceas, lianas, plántulas, arbustos, árboles) para la determinación de la dominancia, diversidad y equitatividad en cada parcela.

Con la finalidad de modelar las relaciones entre los patrones espaciales y temporales de la productividad primaria, con variaciones geográficas, regímenes de manejo y perturbación, y con diferencias en estructura y composición del bosque, se tiene contemplado —en una próxima etapa de consolidación del estudio— un análisis a escala del paisaje que incorpore estos datos a la información de satélite procesada a diferentes resoluciones espaciales y espectrales.

Dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas. Uno de los factores clave que controlan la dinámica funcional de los ecosistemas tropicales secos es el marcado patrón espacial y temporal de la disponibilidad de agua en el suelo (Bullock *et al.*, 1995). La fuerte variación estacional e interanual de la precipitación en la zona de estudio, aunada a las marcadas variaciones del relieve, genera un patrón de disponibilidad de agua en el suelo al cual responden los diferentes componentes del ecosistema. Durante los últimos 20 años, hemos estudiado la dinámica energética, hidrológica y biogeoquímica del bosque tropical seco de Chamela, tanto en condiciones naturales como bajo condiciones de manejo a diferentes escalas espaciales y temporales (Sarukhán & Maass, 1990; Maass *et al.*, 2002a). Para ello se ha utilizado una diversidad de técnicas de observación y experimentación que incluyen cuencas aforadas, torres meteorológicas, cuadros permanentes de observación, monitoreos de suelo, agua y vegetación, isotopía estable y radio isótopos. Nos hemos avocado a contestar tres grandes preguntas, que se plantean a continuación con información sobre el trabajo que se ha estado realizando.

¿Cómo varía espacial y temporalmente la disponibilidad del agua, la energía y los nutrien-

tes en el ecosistema de bosque tropical seco? Para ello hemos realizado un análisis de la lluvia en el tiempo y el espacio (García-Oliva *et al.*, 1991), incluyendo su intensidad (Galicia *et al.*, 1999) y su composición química (Campo, 1995; Campo *et al.*, 2000). Hemos determinado el porcentaje del agua que entra por lluvia que es interceptada por el dosel (Cervantes, 1988; Burgos, 1999), así como aquel que escurre por los troncos (Cervantes *et al.*, 1988). Por medio de torres meteorológicas, hemos seguido los patrones diarios, mensuales y anuales de radiación, de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento a nivel del dosel del BTS (Barradas, 1991; Camou, 2001; García-Oliva *et al.*, 2002). Se ha descrito la variación espacial de la radiación potencial (Galicia *et al.*, 1999) así como el perfil vertical de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el dosel (Parker *et al.*, 2005). Se tienen datos sobre el aporte del rocío a la humedad ambiental (González, 1990), así como de las tasas de evapotranspiración potencial y real (Barradas & Fanjul, 1985; Burgos, 1999). Se ha realizado un monitoreo por 20 años de los patrones de escorrentía en las cuencas (Cervantes *et al.*, 1988; López, 1992; Maass *et al.*, en prep.) y se han medido los niveles de nutrientes en el agua de escorrentía (Campo *et al.*, 2000) así como su carga de sedimentos (García-Oliva *et al.*, 2003). Contamos con información sobre las tasas de infiltración a nivel de la cuenca (Cervantes *et al.*, 1988), así como con análisis detallados de la variación de humedad del suelo en el tiempo y el espacio (Zarco, 1994; Galicia *et al.*, 1999). Se han realizado análisis de las condiciones edáficas en diferentes puntos de las cuencas, incluyendo aspectos estructurales (Galicia, 1992), su capacidad de retención de humedad (Galicia *et al.*, 1995) y su disponibilidad de nutrientes (García-Méndez *et al.*, 1991 y 1992; Solís, 1993; Davidson *et al.*, 1993; Jaramillo y Sanford, 1995; Díaz, 1997; Campo *et al.*, 1998, 2001). Como se mencionó anteriormente, tenemos 20 años de datos sobre las variaciones de mantillo en pie. Conocemos el contenido de elementos minerales de la hojarasca que componen dicho mantillo, así como los flujos de N y P al suelo por vía de la caída de hojarasca (Esteban, 1986; Díaz, 1997).

¿Cómo responden los diferentes componentes del ecosistema a esta variación espacial y temporal del agua, energía y nutrientes? Se han estudiado las adaptaciones ecofisiológicas de las plantas al estrés hídrico (Fanjul & Barradas, 1985, 1987; Moreno, 1998), y hemos seguido la respuesta fenológica del dosel por más de 20 años a través de la caída de hojarasca y la dinámica del mantillo en el suelo (Martínez-Yrizar *et al.*, en preparación). Previo a la caída de hojarasca, se tienen estimaciones de la eficiencia de reabsorción de nutrientes en distintas especies, en condiciones contrastantes al interior de la cuenca 1 y entre años que difieren en precipitación (Rentería *et al.*, 2005). Así mismo, por tres años analizamos la variación en el índice de área foliar (Maass *et al.*, 1995). También se ha medido el efecto protector a las lluvias de la capa de hojarasca en el suelo (Maass *et al.*, 1988; Maass, 1992), así como sus tasas de descomposición (Martínez-Yrizar, 1980). Se ha documentado la respuesta del crecimiento de raíces finas al inicio de la época de lluvias (Kummerow *et al.*, 1990; Castellanos, 1997) y la nodulación de árboles potencialmente fijadores de nitrógeno en respuesta a la humedad del suelo (González-Ruiz, 2001). Se han realizado experimentos para conocer las tasas de mineralización de nutrientes en el suelo (González-Ruiz, 1997; Campo *et al.*, 1998), la dilución de los mismos por efecto de la precipitación (Campo, 1995) y los mecanismos de retención de nutrientes por procesos de inmovilización microbiana (Campo *et al.*, 1998). Así mismo, se han realizado experimentos de fertilización con fósforo en condiciones naturales (Jaramillo & Maass, en preparación). Se ha calculado la tasa de intemperización de la roca madre (Campo, Maass & De Pablos, 2001), así como las emisiones de óxidos de nitrógeno a la atmósfera por procesos microbianos en el suelo (Davidson *et al.*, 1991). Finalmente, hemos evaluado el efecto de la distribución de ramas muertas en el dosel en la calidad y cantidad de la lluvia indirecta (Maass *et al.*, 2002b). ¿Cómo responde el ecosistema, en términos de su dinámica hidrológica energética y biogeoquímica, a la intervención humana? El abordaje por parte del grupo a esta última pregunta se desarrolla como parte de otras áreas temáticas, particularmente

en la relacionada con los patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Los ecosistemas naturales proporcionan una serie de servicios ambientales como regulación del clima, polinización y reciclaje de nutrientes, de los que depende el ser humano para sobrevivir. La calidad de estos servicios dependerá de las condiciones en las que se encuentren los sistemas naturales. En este sentido, es muy relevante evaluar la relación entre la diversidad biológica y el funcionamiento de los ecosistemas (Daily, 1997). Un problema fundamental para entender tales relaciones es la falta de información acerca de la variabilidad temporal y espacial en la diversidad biológica en sistemas naturales y transformados. Los bosques tropicales secos de México son ecosistemas estacionales con una marcada variación temporal en la disponibilidad de los recursos y en la fisonomía de la vegetación. Estos bosques están desapareciendo a tasas muy altas, poniendo en riesgo la funcionalidad de dichos ecosistemas y los servicios naturales que prestan, así como amenazando con la extinción a un tercio de la diversidad biológica y especies endémicas de México (Bullock *et al.*, 1995; Ceballos & García, 1995; Noguera *et al.*, 2002).

Una compilación del conocimiento biológico y ecosistémico de la región de Chamela se publicó en Noguera *et al.* (2002). Conscientes de la importancia de contar con inventarios actualizados y el establecimiento de programas para el estudio de la biodiversidad, se ha promovido la realización de inventarios y monitoreo de especies y comunidades de plantas y animales por más de 30 años. Actualmente se cuenta con un listado actualizado de los vertebrados (471 especies), plantas vasculares (1,150 especies) y más de 2,000 especies de artrópodos. Restan aún por inventariar otros grupos de invertebrados. La investigación sobre diversos aspectos de la diversidad y los ecosistemas de la región de Chamela ha generado más de 150 tesis y cerca de 430 artículos científicos (<http://www.ibiologia.unam.mx/ebchamela>).

Gran parte de la investigación en Chamela se ha enfocado a entender el efecto de la estacionalidad ambiental en los componentes de las

comunidades biológicas, aunque el esfuerzo ha variado entre los distintos grupos taxonómicos. Así, en plantas se conoce la fenología de un número considerable de especies, mientras que para otras se han estudiado su uso y consumo por algunas especies de insectos, aves y mamíferos. También se conoce con detalle la estructura de la vegetación, tanto en las pendientes como en los arroyos. En el caso de los vertebrados e invertebrados se han desarrollado varios programas de monitoreo de las poblaciones para diversos grupos taxonómicos como roedores, murciélagos, avispas, abejas, insectos, aves, reptiles y anfibios y de especies en particular como algunas lagartijas (por ejemplo roño de paño y garrobo), aves (perico guayabero y el trogón) y mamíferos (venado cola blanca, puma, jaguar y coatí). En ellos se ha puesto énfasis en los patrones espacio-temporales en el uso de los recursos y la actividad reproductiva. Algunos de estos programas ya llevan más de ocho años realizándose, lo que permite determinar tendencias que pudieran utilizarse en comparaciones entre taxa que faciliten entender mejor la dinámica de estos bosques.

Mamíferos: para los pequeños mamíferos se ha hecho un monitoreo por más de 15 años, comparando la estructura de comunidades y la dinámica de poblaciones de especies de la vegetación de arroyo y las pendientes. El muestreo se realiza en cuadros de 0.8 ha con trampas Sherman y continuará por los siguientes años. También se tienen datos para un periodo cercano a los cuatro años de la sobrevivencia y el uso de espacio y recursos que los tejones presentan en la zona, proyecto que se busca reiniciar. La telemetría y el trampeo intensivo han sido las técnicas básicas para este proyecto.

Aves: desde 1998 se ha muestreado mensualmente la abundancia, diversidad y el uso del hábitat de aves en cuatro sitios permanentes, en arroyos y laderas. La biología de pericos ha sido estudiada desde 1996. Entre las técnicas utilizadas se encuentra el establecimiento de transectos para llevar a cabo “conteos por puntos” (Hutto *et al.*, 1986; Ralph *et al.*, 1996). La telemetría ha sido esencial en el estudio de pericos y trogones por más de seis años. Además se ha estudiado el efecto de la fragmentación en la diversidad de aves.

Reptiles y anfibios: la dinámica de la estructura de la comunidad de estos grupos ha sido registrada desde 1995 mediante el empleo de una combinación de trampas de embudo y caída, cercas de desvío y transectos de búsqueda; técnicas estándar que han dado buenos resultados (Heyer *et al.*, 1994). Además se ha estudiado el efecto de la fragmentación en estos grupos.

Artrópodos: es un grupo bien estudiado. Se cuenta con ocho años de información sobre la variación poblacional de insectos y con datos importantes de la historia natural y ecología de muchas de las especies. Se han utilizado trampas Malaise, ubicadas en el bosque, las laderas y arroyos, con el objetivo de determinar los patrones espacio-temporales y su posible relación con factores climáticos como la precipitación. A la fecha, estos datos han sido procesados hasta el nivel de Orden.

Vegetación: desde 1979 se realizan censos anuales de la vegetación leñosa de siete sitios permanentes (40 × 80 m) en las cuencas, registrándose la fenología e incrementos diamétricos de todas las especies presentes en los sitios (Pérez-Jiménez, en prep.). En 2004, dentro del proyecto MABOTRO, se iniciaron censos anuales y sub-anuales plantas arbóreas y arbustivas en 12 parcelas permanentes a lo largo de un gradiente sucesional (3 pastizales recién abandonados, 3 bosques secundarios 3-5 años, 3 bosques secundarios 8-12 años, 3 bosques maduros).

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. México es un ejemplo muy representativo de la combinación entre biotas únicas y diversas con la rápida destrucción del hábitat natural. Las tasas de deforestación para el bosque tropical seco del país son estimadas entre 1.4 a 1.9% anual, llegando a ser tan altas como 3.8% en la región de Chamela (Maserá *et al.*, 1997; Trejo y Dirzo, 2000). Se considera que solamente queda 25% del área que este tipo de comunidad vegetal cubría originalmente en el país (Trejo y Dirzo, 2000). Las perturbaciones de estos ecosistemas se vuelven aún más críticas si consideramos que la deforestación ha incrementado la fragmentación del bosque (Semarnap, 1998). La pérdida de masas boscosas y su fragmentación son dos procesos interrelacionados que representan las mayores amenazas a

la biodiversidad del planeta (Simberloff, 1986). En la región de Chamela, el bosque es eliminado por medio de la roza, tumba y quema, para introducir principalmente praderas para uso ganadero y agricultura en las zonas planas cercana a los principales arroyos (De Ita-Martínez, 1983; Gutiérrez-Alcalá, 1993; Burgos & Maass, 2004). Estas transformaciones reducen la diversidad biológica (Miller & Kauffman, 1998) y afectan la estructura y el funcionamiento del ecosistema (García-Oliva *et al.*, 1999; Cotler *et al.*, 2002; Maass *et al.*, 2002a; Jaramillo *et al.*, 2003). Sin embargo, debido a la alta variabilidad anual de la lluvia en esta región (García-Oliva *et al.*, 1995, 2002), ciertas respuestas a la perturbación pueden estar confundidas con la respuesta a la variación anual. Por otro lado, estudios de fragmentación en ecosistemas tropicales realizados durante varias décadas (Bierregaard *et al.*, 1992), han permitido la elaboración de un marco conceptual de los efectos en distintos procesos. Éstos incluyen la alta vulnerabilidad de especies especialistas y con interdependencias co-evolutivas, amplia variabilidad en la respuesta de las especies de acuerdo al grupo taxonómico, incrementos de los efectos de borde, invasiones de especies exóticas, cambios micro-climáticos, cambios en la abundancia y diversidad de insectos, etc. (Laurence *et al.*, 1997). La investigación del papel de los regímenes de perturbación en la estructura y función de ecosistemas requiere realizarse a escalas múltiples y con una perspectiva regional a largo plazo. Tomando como base los trabajos llevados a cabo dentro de la región, se propone desarrollar líneas de investigación encaminadas a dilucidar la dinámica espacial y temporal de los patrones de perturbación, así como sus impactos en los diferentes niveles de organización.

Las preguntas que se han abordado se pueden agrupar en tres tipos. El primer tipo corresponde a los patrones espaciales de las características del paisaje y de la perturbación: 1. Cartografía morfogenética del relieve y edafogenética a diferentes escalas de la región de Chamela, y 2. Descripción de la ecología del paisaje y dinámicas espacio-temporales de cambio en el uso del suelo, la deforestación y la fragmentación. El segundo tipo corresponde al efecto de la perturbación sobre la

composición, estructura y procesos funcionales del ecosistema: 1. Efecto de la transformación a praderas sobre la dinámica de nutrientes, agua y estabilidad del suelo; 2. Efecto de la invasión de especies leñosas en sitios perturbados sobre la dinámica de nutrientes y 3. Efecto de la extracción selectiva de una especie arbórea (*Croton*, sp.) en la composición y estructura del bosque. El tercer tipo corresponde al efecto de la perturbación sobre el funcionamiento de las cuencas hidrológicas: 1. Evaluación de la calidad de los cuerpos de agua (superficiales y subterráneos) de la cuenca del río Cuixmala, 2. Análisis espacial de la vulnerabilidad de los suelos a la perturbación.

Para el primer grupo de preguntas se han utilizado sistemas de sensores remotos (imágenes de satélite, fotos aéreas e imágenes de video), cartografía topográfica y temática del sitio de estudio y verificación de campo, específicamente en cuanto al levantamiento de suelos. Para el segundo tipo de preguntas se han utilizado parcelas de estudio con diferentes tiempos de manejo en ejidos cercanos a la reserva Chamela-Cuixmala. Así mismo, se ha estado evaluando la capacidad de rebrote de especies leñosas sometidas a cosecha; también se está analizando la regeneración como respuesta a distintos niveles de poda de los rebrotes (Rendón, en prep.). Para el tercer tipo de preguntas se han tomado muestras de agua (en arroyos, río Cuixmala y en pozos) para cuantificar parámetros fisicoquímicos, bacteriológicos y plaguicidas organoclorados para definir la calidad del agua y asociarla con las fuentes potenciales de contaminación. Asimismo, se está realizando un levantamiento morfo-edafológico de la cuenca del río Cuixmala a partir del cual se realizarán análisis de suelos, con énfasis en la agregación del suelo, en sitios representativos.

Efecto del cambio climático en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. La tendencia de largo plazo de la temperatura y precipitación se está midiendo con registros diarios en estaciones micrometeorológicas en la Estación de Biología y en la Reserva de Cuixmala. Ya se han realizado algunos análisis de las tendencias en los patrones de precipitación de la región (García-Oliva *et al.*, 1991). Se está trabajando en las cinco pequeñas cuencas hidrológicas en las que se tienen censados árboles a los que año con año

se les ha determinado su diámetro a la altura del pecho (DAP). Con esa información y las ecuaciones desarrolladas para el BTS por Martínez-Yrizar *et al.* (1992), se calculan los cambios en biomasa de los árboles a lo largo del tiempo. Se tienen ya estimaciones “estáticas” de los almacenes de C de estos bosques de Chamela, así como de praderas de la región (Jaramillo *et al.*, 2003), pero es necesario abordar el problema con una perspectiva dinámica de largo plazo. La respuesta funcional potencial del ecosistema a variables del cambio climático se está explorando mediante el uso de modelos de simulación de procesos hidrológicos (*Prosper*) y de procesos biogeoquímicos (*Century*). Ambos modelos han sido parametrizados para el bosque de Chamela en colaboración con investigadores del Laboratorio Hidrológico de Coweeta en Carolina del Norte y del Laboratorio de Ecología de Recursos Naturales (NREL, por sus siglas en inglés) de la Universidad Estatal de Colorado. Se han realizado experimentos con respecto a la función hidrológica con el modelo *Prosper* (Vose & Maass 1999) y el modelo *Century* está listo para realizar las simulaciones pertinentes.

Existen diversas perspectivas en el largo plazo. Por un lado, se continuará con el seguimiento de variables climáticas fundamentales y de procesos ecosistémicos vinculados a la variabilidad del clima como son el crecimiento de árboles, la productividad primaria y los patrones de escorrentía, entre otros. Se pensará en la realización de experimentos en los que se modifique la disponibilidad de agua en el suelo, variable afectada por el cambio climático, para determinar cambios en procesos fundamentales como la mineralización de C y nutrientes, procesos rizosféricos, etc. Se continuarán utilizando los modelos de simulación para estudiar las posibles consecuencias del cambio climático en el trópico seco a escalas locales y regionales y se incorporará el uso de la percepción remota para determinar las tendencias de ciertos procesos en el tiempo (por ejemplo, variación en patrones fenológicos).

Interacciones al nivel de interfase entre los ecosistemas naturales y manejados. Se tiene un conocimiento detallado sobre la flora de Chamela, de su fenología y de algunos procesos ecofisiológicos (Barradas & Fanjul, 1985; Fanjul & Barra-

das, 1987; Balvanera *et al.*, 2002). Se aprovechará esta información para determinar si la creación de bordes debido a la fragmentación ocasiona alteraciones en los parámetros de nacimiento, mortalidad, crecimiento y reclutamiento de las poblaciones naturales de árboles de especies características (*Ipomea*, *Bursera arborea*, *Ceiba aesculifolia*, etc.) entre el borde y hacia el interior de del bosque (> 500 m). También se determinará si existen cambios fisiológicos (evapotranspiración) y fenológicos (floración, fructificación, etc.) y se evaluará si el número de especies exóticas o invasoras de plantas se incrementa con la presencia de bordes. Debido a que la fragmentación ocasiona alteraciones en las comunidades vegetales y animales, las interacciones existentes entre ambos grupos también son afectadas (Miranda, datos no publicados). Se evaluarán la depredación y dispersión de semillas por roedores, la descomposición de materia orgánica, y la herbivoría.

La luz del sol, el bióxido de carbono, la temperatura, el agua y los nutrientes del suelo son recursos necesarios para la producción primaria en los ecosistemas terrestres. En la región de Chamela, se ha observado que estos elementos son modificados drásticamente con las perturbaciones humanas (García-Oliva *et al.*, 1994; García-Oliva & Maass, 1998). Se evaluará si estas modificaciones afectan los procesos de reciclaje de nutrimentos, flujos de agua y la incidencia de fuego en los bordes (González-Flores, 1992; Toledo, 2001; Moreno, datos no publicados). Se cuenta con información detallada sobre el arreglo espacial de los fragmentos en la región (Miranda, en revisión), por lo que se evaluarán los cambios en su arreglo espacial a través del tiempo (Miranda, datos no publicados).

Definición de criterios para el manejo y conservación de ecosistemas. En la búsqueda de criterios que puedan ser tomados en cuenta para lograr un manejo sustentable de los ecosistemas en la región de Chamela, hemos orientado parte de nuestra investigación a contestar las siguientes preguntas:

¿Qué información existe para el sitio que pueda contribuir al diseño de criterios para el manejo? En la descripción de las áreas temáticas anteriores, se hace un recuento del gran acervo de conocimientos generados durante más de

30 años de investigación en Chamela (Nogueira *et al.*, 2002). El análisis de esta información nos está permitiendo identificar cuáles son los principios ecológicos que pueden ser utilizados para el manejo de ecosistemas de la zona, cuáles son los procesos que mantienen la integridad funcional del ecosistema, qué factores los alteran, cuál es una buena referencia de manejo sustentable, a qué escala espacial y temporal es más adecuado abordar dicho manejo y qué limitaciones existen para lograr un buen manejo (Maass *et al.*, en prep.). Considerando la importancia que ha tenido la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala en la conservación del bosque tropical caducifolio del occidente del país (<http://www.ine.gob.mx>), se han desarrollado trabajos que analizan el papel de la reserva en la conservación (Ceballos & García, 1995; Ortega-Huerta & Peterson, 2004). En los últimos años, se ha incursionado también en el análisis del sistema social tratando de entender cómo los distintos actores perciben su interacción con los ecosistemas (Castillo *et al.*, 2005). Debido a que el mayor porcentaje del territorio en esta región pertenece a ejidos (<http://jal.inegi.gob.mx>), los ejidatarios han sido un importante foco de atención. Se han estudiado las percepciones de los ejidatarios y sus esposas sobre el BTS, su uso y su conservación (Magaña, 2003), así como sobre su deterioro y posibilidades de restauración (Cordero, 2005). Las percepciones de sectores tales como las comunidades de avecindados (gente sin tierras) y la industria turística también han sido examinadas, principalmente en relación a cómo estos grupos entienden y valoran los bienes y servicios brindados por los ecosistemas (Martínez, 2003; Godínez, 2003). Otro aspecto importante se refiere a cómo los actores sociales perciben los instrumentos de política ambiental presentes en la región, principalmente la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala y el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la costa de Jalisco (Pujadas, 2003). Por otro lado, con base en el reconocimiento de la importancia de los procesos educativos en relación con la formación de actitudes hacia el ambiente de los distintos actores, se están realizando estudios sobre el papel de la educación formal en la transmisión de información ambiental y la for-

mación de valores en el nivel primaria en doce comunidades aledañas a la Reserva Chamela-Cuixmala (Amante & Barraza, 2002; Amante, 2005), así como en el nivel preescolar (Cano, 2006). Además, se está trabajando con un grupo de mujeres sobre los procesos de transmisión del conocimiento ambiental (Gómez, 2008). Un aspecto que se ha señalado como fundamental para la construcción de alternativas sustentables de manejo es la integración de los conocimientos ecológicos con los provenientes de las disciplinas sociales (Gunderson *et al.*, 1995). En este sentido, existen avances importantes para Chamela en cuanto a la integración de conocimientos a través de un trabajo sobre los servicios ecosistémicos brindados por el BTS (Maass *et al.*, 2005) adaptando el marco conceptual desarrollado por la evaluación de ecosistemas del milenio (Millennium Ecosystem Assessment, 2003).

¿Qué información es necesario generar? Un primer aspecto que se reconoce como esencial para la posible definición de criterios de manejo es realizar investigaciones a escalas mayores a las que comúnmente se trabaja en la investigación ecológica. Reconocemos por ejemplo, que para aportar información útil para la definición de criterios de manejo de los recursos hídricos, es necesario pasar de los estudios a nivel de parcela (m^2) y micro-cuencas experimentales (has), a la generación de información a nivel de grandes cuencas hidrológicas (miles de km^2), que incluyan no sólo los sitios de apropiación del recurso, sino también las zonas de recarga. En relación con la importancia del BTS en las escalas nacional y global, se continuará avanzado en la realización de trabajos que, a través de métodos de percepción remota y sistemas de información geográfica, aborden los problemas de deforestación y de fragmentación de hábitats (Miranda, 2008). Se continuará el análisis del papel de la Reserva en la protección de patrones espaciales-regionales de especies, mediante la aplicación de métodos de complementariedad y priorización de áreas naturales (Ortega-Huerta & Peterson, 2004). Finalmente, con respecto a la dinámica social, y tomando en cuenta los avances conceptuales brindados por los estudios de los sistemas socio-ecológicos (Berkes *et al.*, 2003) y las propuestas para el análisis de instituciones (Ostrom, 1990),

se reconoce necesario entender cómo están funcionando hoy en día los ejidos en la región. El interés último de estos estudios sería examinar si los ejidos como instituciones de manejo agropecuario pueden transformarse en instituciones de manejo sustentable de ecosistemas.

¿Cómo se incorporan los conocimientos generados en la definición de criterios para el manejo? Los conocimientos generados sobre los ecosistemas y sobre las interacciones de los grupos humanos con éstos, deberán servir de base para la definición de criterios del manejo en la región bajo la perspectiva de la sustentabilidad. Para que dichos criterios puedan ser utilizados en los procesos de toma de decisiones, se recomienda que se construyan a través de una comunicación interactiva y constante entre los investigadores y los actores sociales directamente involucrados en el manejo, esto es con los responsables de la toma de decisiones sobre el ordenamiento, aprovechamiento, conservación y restauración de los ecosistemas (Walters, 1998). Para ello, se deberán crear espacios para el intercambio de información y visiones entre los distintos actores de la región de Chamela.

5.4. Ecosistemas del altiplano

5.4.1. Antecedentes

El Grupo Ecosistemas del Altiplano nace de la colaboración entre varios investigadores de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), los cuales trabajan en varias líneas de investigación desde mediados de los años ochenta. Posteriormente estas interacciones se ampliaron hacia otras instituciones del noreste de México, como el Instituto de Ecología en Durango, Instituto Tecnológico de Monterrey, Instituto Potosino de Investigación Ciencia y Tecnología (IPICYT) y la delegación de la Semarnat en el estado de San Luis Potosí. Así mismo en años recientes se ha incrementado la colaboración con instituciones de los Estados Unidos, como el Departamento de Biología de la Universidad Estatal de Colorado y el *Platte River Whooping Crane Maintenance Trust* ubicado en Nebraska.

Los esfuerzos de investigación se enfocan a la región del altiplano mexicano conocida como “El Tokio”, donde se distribuyen los pastizales gipsófilos y salinos en el noreste de México y la cual es reconocida como una región prioritaria para la conservación de especies de aves residentes endémicas y migratorias por la Conabio, la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte y The Nature Conservancy entre otras; la región es considerada como un AICA (área de importancia para la conservación de aves) por Cipamex (la sección mexicana del Consejo Internacional para la Preservación de las Aves). Otros temas de interés del grupo consisten en el estudio de la ecología de poblaciones y la conservación del perrito llanero o perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*) y cuestiones relacionadas con problemas como la desertificación y la conservación y manejo de ecosistemas de zonas áridas.

El grupo de trabajo, que está constituido a la fecha por 11 miembros involucrados en diferentes temáticas, tiende a expandir sus vínculos de investigación a otras instituciones dentro y fuera del país, con contactos en el Centro para la Conservación de la Naturaleza en Gotinga, Alemania y Pronatura-Noreste.

La investigación, que inicio en el año de 1984 con trabajos de tesis de licenciatura limitados en espacio y tiempo de varios de los investigadores que conforman este grupo, se concretó en una colecta de datos continua a partir del año 1999, con el inicio de un estudio de distribución geográfica de las poblaciones de perrito llanero mexicano en el altiplano. Posteriormente comenzaron a generarse datos sobre el tamaño de las poblaciones, reproducción y alimentación de esta especie amenazada, ampliando el trabajo al monitoreo de la flora y vegetación y la fauna de aves y mamíferos del área, así como una caracterización de los suelos y procesos de contaminación.

5.4.2. Sitios de trabajo

Los sitios de estudio están inmersos en la región “El Tokio”, en la cual se encuentran los últimos remanentes de pastizales bajos gipsófilos y salinos, que son el refugio del perrito llanero mexicano, *Cynomys mexicanus* (Scott *et al.*, 2004;

Rioja-Paradela *et al.*, 2008) y el gorrión de Worthen, *Spizella wortheni* (Canales-Delgadillo *et al.*, 2008). El área se caracteriza por presentar suelos con altos contenidos de yeso y carbonatos de calcio, así como una vegetación de porte bajo que no rebasa los 15 cm en promedio. El área es fuertemente impactada por actividades agrícolas y ganaderas, las cuales se llevan a cabo desordenadamente y sin medidas de mitigación.

Específicamente el grupo trabaja en colonias de perro llanero con decreto estatal de áreas naturales protegidas como La Soledad y Hediondilla en Nuevo León. Adicionalmente se realizan actividades de colecta de datos en cuatro colonias más, distribuidas en los estados de Coahuila y San Luis Potosí, con la finalidad de dar seguimiento a los posibles cambios en el ecosistema, producto de la exclusión de actividades humanas de gran impacto.

El objetivo principal del grupo de trabajo radica en comprender los procesos que rigen la dinámica de los pastizales y que son esenciales para su persistencia, así como la interrelación de los factores que conducen a su degradación. Para llegar a ello, se han diseñado una serie de investigaciones a corto, mediano y largo plazo, que buscan dar respuesta a diferentes planteamientos sobre el funcionamiento, estructura y composición del ecosistema, así como procesos de desertificación y contaminación de suelo.

5.4.3. Líneas de investigación

Dinámica del agua, carbono y nutrientes. Este es el tema incorporado más recientemente a las tareas del grupo. El objetivo es determinar qué caracteres morfo-fisiológicos están involucrados en los procesos de tolerancia o susceptibilidad a factores de estrés (sequía, contaminantes, sobrepastoreo) en plantas. A la fecha, se desarrolla una investigación sobre contaminantes orgánicos en el área, su impacto en el suelo, en el agua del subsuelo y en el desarrollo de la flora.

Biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. En esta área temática se tiene como objetivo entender los mecanismos que mantienen la diversidad en los pastizales del altiplano mexicano y sus relaciones interespecíficas. Para ello se trabaja en parcelas y transectos

permanentes, donde se llevan a cabo monitoreos poblacionales de diferentes grupos de vertebrados, los cuales se realizan en forma estacional. Así mismo, se lleva un seguimiento de cambios en la composición florística, crecimiento de las colonias del perro llanero y un estudio sobre la genética poblacional de esta especie; actualmente nos enfocamos a una selección de especies que se estudiarán de manera sistemática en cuanto a reproducción y comportamiento.

Los resultados generados a la fecha nos indican que la distribución del perro llanero mexicano y por ende de los pastizales gipsófilos y salinos del noreste de México, se redujo en 74% de su distribución histórica natural y que los fragmentos aún presentes de este ecosistema se encuentran fuertemente degradados por pastoreo y desertificación (Scott-Morales *et al.*, 2004). Los pastizales gipsófilos son sin duda un refugio para varias especies residentes y migrantes en la región. Del total de especies de flora presentes, 38 son exclusivas del desierto chihuahuense y 20 son exclusivas de pastizales asociados a comunidades de perritos llaneros (Estrada *et al.*, 2005). En vertebrados la presencia de dos especies consideradas a nivel nacional como endémicas y en peligro de extinción son *Cynomys mexicanus* y *Aquila chrysaetos*, así otras más consideradas bajo algún estatus de conservación como *Taxidea taxus*, *Vulpes macrotis*, *Parabuteo unicinctus*, *Spizella wortheni*, *Falco mexicanus*, *Falco peregrinus*, *Charadrius montanus* especies consideradas amenazadas, *Buteo albigaudatus* y *B. jamaicensis* en protección especial (Scott, 1999; Canales-Delgado *et al.*, 2008).

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. En esta área se busca construir una serie de indicadores que permitan evaluar los procesos y nivel de perturbación en los ecosistemas de pastizales gipsófilos y halófilos mediante evaluaciones edáficas del sitio. A través de la toma de muestras puntuales en tiempo, se analiza la composición de suelo bajo diversos usos y se determinan los cambios, producto posible de una perturbación.

La calidad de sitio es sin duda un factor determinante en composición y estructura de las comunidades en pastizales; nuestros registros a la fecha muestran una tendencia a conformación de comunidades sencillas y poco estructuradas

en áreas de pastizal pequeñas y con presencia de disturbio, no obstante la situación geográfica parece influenciar la conformación de dichas comunidades, sin considerar aún el reservorio regional de especies (datos sin publicar). La caracterización de los primeros 43 sitios de pastizal, ubicados en los estados de Nuevo León, Coahuila y San Luis Potosí, indican diferencias considerables en los contenidos de yeso y carbonatos de calcio, así como conductividad y pH del suelo, lo que seguramente se reflejará en variaciones en la composición de la flora del sitio y fauna asociada (datos sin publicar). Aunado a esto, el uso del recurso de manera desordenada ha ocasionado que en las colonias más sureñas en distribución, algunas áreas sean abandonadas o presenten una dinámica metapoblacional no existente en el centro de su distribución (Scott-Morales *et al.*, 2004, 2008).

Interacciones al nivel de interfase entre ecosistemas manejados y naturales. Por último, la temática de interacciones a nivel interfase entre ecosistemas manejados y naturales tiene como objetivo determinar la dinámica de los pastizales del altiplano mexicano, así como los procesos de sucesión natural e inducida, para implementar estrategias de manejo en estos ecosistemas. Para ello, se muestrea el área de manera sistemática tomando en cuenta el gradiente de disturbio y condiciones de ecotonos. Los muestreos se realizan estacionalmente en transectos y parcelas cuadrangulares de muestreo, en áreas de cultivo abandonadas y áreas de pastizal aún presente. El impacto que tiene el pastoreo sobre la población del perrito llanero se demuestra analizando las coberturas del pastizal y densidades estimadas en las poblaciones, donde encontramos que las mayores densidades (15 a 21 animales/ha) se presentan en coberturas que oscilan entre 45% y 50%; caso extremo lo son coberturas menores a 10% donde las densidades no rebasan los 3 animales/hectárea (Scott-Morales & Estrada, 1999). El éxito reproductivo es otro posible indicador del efecto del pastoreo, ya que existe diferencia en este factor entre los clanes o familias que habitan áreas con y sin manejo de pastoreo (Rioja-Paradela *et al.*, 2008).

Otros trabajos en proceso se centran en temas como los contaminantes agrícolas en las co-

lonias del perro llanero, calidad de agua, erosión y desertificación.

5.5. Ecosistemas costeros de Jalisco y Colima

5.5.1. Antecedentes

El Grupo de Ecosistemas Costeros de Jalisco y Colima inició desde 1992 su programa de investigación y monitoreo sobre los ecosistemas marinos y costeros de la región sur de Jalisco y norte de Colima. El grupo tiene como base al actual Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras (antes Centro de Ecología Costera) de la Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, con sede en San Patricio-Melaque, Jalisco, y en él colaboran investigadores de otras unidades de la misma universidad como el Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías y de otras instituciones como el Centro de Investigaciones Marinas de la Universidad de La Habana.

El Pacífico central mexicano está considerado como una de las regiones marinas y costeras menos estudiada del país; aún persisten huecos en el conocimiento de su biodiversidad y sus procesos ecológicos y oceanográficos esenciales. El objetivo inicial del grupo fue elaborar inventarios de peces, invertebrados y zooplancton, así como caracterizar la variabilidad ambiental oceanográfica; para ello se desarrollaron proyectos que consideraban muestreos en estuarios, lagunas costeras y zonas de arrecifes, así como en la plataforma continental. También se inició con un monitoreo de la estructura termohalina de la masa de agua de plataforma continental y de ondas internas. Los objetivos de la segunda etapa se encaminaron al estudio de las comunidades de peces e invertebrados de fondos blandos y sobre las comunidades de peces explotadas en las pesquerías locales. La tercera etapa —en la cual se encuentra actualmente el grupo— es el monitoreo de impactos de la pesquerías ribereñas y de la pesca de arrastre de camarón, la elaboración del primer modelo del ecosistema, y la importancia de los cuerpos costeros como hábitats esenciales. Se han enfatizado esfuerzos en el monitoreo de

las perturbaciones naturales como el fenómeno de El Niño-La Niña, y actualmente las estrategias de investigación están dirigidas a la determinación de patrones ecológicos y pautas interanuales de variabilidad del ecosistema costero.

5.5.2. Sitios de trabajo

El área de estudio abarca la franja costera y la plataforma continental en una extensión de aproximadamente 100 km, que va desde la desembocadura del Río Cuitzmala en el estado de Jalisco, hasta la Laguna de Cuyutlán en Colima. De acuerdo con la Conabio los sitios de trabajo del grupo se encuentran dentro de regiones hidrológicas y marinas prioritarias; éstos incluyen áreas protegidas para la conservación de tortugas marinas y sitios Ramsar. Esta área es de gran interés no sólo por su riqueza biológica y la existencia de áreas que aún están bien conservadas, sino también por los problemas característicos del desarrollo de las zonas costeras donde la urbanización, los proyectos turísticos, la alteración de los sistemas hidrológicos, la pesca y otros usos de los recursos naturales tienen un impacto considerable.

Los trabajos de monitoreo que realiza el grupo consideran a toda el área antes mencionada, pero el mayor interés recae en las bahías de Navidad y Tenacatita, así como en la laguna de Barra de Navidad, que es donde se ha centrado el estudio de algunos procesos ecológicos y ambientales. Para el desarrollo de los estudios se tiene como base las instalaciones del Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras, en San Patricio-Melaque, Jalisco. Además se cuenta con el Barco de Investigación Pesquera BIP V, una embarcación con casco de fibra de vidrio de 13 m, dotada para la pesca de arrastre tipo camaronero y la investigación oceanográfica.

La laguna de Barra de Navidad constituye el principal cuerpo de agua costero de la Bahía de Navidad y el segundo más grande del estado de Jalisco. La laguna tiene una superficie de espejo de agua de 3.7 km² y una longitud y ancho máximas de 3.5 y 1.5 km respectivamente; está conectada permanentemente con el mar por un canal de aproximadamente 80 m de anchura, con profundidades que alcanzan hasta 8 m, cuya parte

central es periódicamente dragada para permitir la navegación. La profundidad promedio no excede los 4 m, pero en la porción sureste y este pueden existir profundidades de sólo 0.5 m, lo que hace imposible la navegación. El principal aporte de agua dulce a la laguna proviene de los ríos Marabasco (que nace en la Sierra de Manantlán, otro sitio de la Red MEX-LTER, véase sección 5.10) y Arroyo Seco, particularmente en la temporada de lluvias. La circulación de la masa de agua de la laguna se encuentra fuertemente relacionada con mareas baroclínicas y barotrópicas, aunque los vientos y el aporte fluvial contribuyen en menor grado.

Existen dos pautas dominantes de circulación oceánica en la zona costera de Jalisco y Colima, las cuales establecen el hidroclima de la región; la primera está determinada por la contracorriente Norecuatorial, que fluye hacia el norte y se caracteriza por una masa de agua cálida y una termoclina profunda, la cual tiene especial influencia desde mediados de primavera hasta finales de otoño. La segunda pauta está asociada con la corriente de California, la cual fluye hacia el sur y se caracteriza por temperaturas frías y procesos advectivos costeros. Esta corriente se origina desde finales de invierno hasta principios de primavera (Filonov *et al.*, 2000; Franco-Gordo *et al.*, 2001a, 2001b, 2002, 2003).

Las condiciones hidrodinámicas de la zona determinan la pauta de variabilidad ambiental y las pautas de producción biológica, a través de un acoplamiento físico-biológico. Un acoplamiento entre los procesos costeros en la formación de surgencias en el periodo de influencia subtropical (enero-mayo) y el aporte de sedimentos terrígenos durante el periodo de influencia tropical (junio-diciembre), determinan los ciclos de productividad primaria y secundaria, así como el acoplamiento de los eventos reproductivos de la mayoría de las especies de peces e invertebrados. La recomposición estacional de las asociaciones de peces e invertebrados responde también a esta pauta de variabilidad ambiental, y sólo eventos como El Niño y la Niña modifican este patrón.

La vegetación de los márgenes de la laguna de Barra de Navidad está compuesta principalmente por manglares de *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans* y *Co-*

nocarpus erectus; estos abarcan una extensión de 571 ha (según Conabio en 2007). De acuerdo a los análisis de las imágenes de satélite, existió un incremento de la cobertura de manglar de 2000 a 2005, particularmente en ambos márgenes del canal de conexión del Río Marabasco y en el margen este del vaso de la laguna.

Las lagunas, humedales y otros hábitats de la zona costera son un importante hábitat para las aves; en conjunto se han reportado más de 100 especies, incluyendo entre estas aves marinas (14), patos (7), playeras (19) y garzas (14) (Hernández-Vázquez *et al.*, 1999, 2002, 2005; Hernández-Vázquez, 2000; Hernández-Vázquez y Fernández, 1999; Hernández-Vázquez y Mellink, 2001). Se destaca que el manglar es usado para descansar por casi 100% de las garzas y grupos afines, así como para alimentación, particularmente por aves marinas; destaca también el uso del espejo de agua para alimentación y descanso por parte de los patos y las garzas. De estas aves, al menos cinco especies están incluidas en la NOM-059-ECOL-2001 de especies raras o amenazadas: *Larus herman*, *Sterna elegans*, *Mycteria americana*, *Egretta refucens* y *Ardea herodias*.

El asentamiento de los primeros pobladores en la costa sur de Jalisco tiene un origen relativamente reciente ya que data de principios del siglo pasado. La extracción de sal y la pesca fueron el principal sustento de los primeros pobladores de la laguna de Barra de Navidad. Sin embargo, la belleza paisajística de la laguna y de la bahía pronto convirtió a Barra de Navidad en uno de los lugares turísticos más reconocidos y visitados de la costa sur del estado de Jalisco. Actualmente los servicios derivados del turismo y la agricultura constituyen los principales pilares de la economía local. Las presiones antropogénicas sobre la laguna de Barra de Navidad son importantes, y están relacionadas con el crecimiento de la infraestructura urbana, construcción de marinas y desarrollos turísticos, incremento del aporte de agua dulce proveniente de un canal artificial de derivación del Río Marabasco y Río Seco, expansión de la frontera agrícola, y el trasporte marítimo, además de contaminación por aguas domésticas sin tratamiento, así como de aceites desechados por la flota pesquera y embarcaciones de prestadores de servicios turísticos.

5.5.3. Líneas de investigación

Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. Se han realizado estimaciones indirectas de la productividad primaria, como la cuantificación de clorofilas y las diferencias en ambientes costeros y de plataforma. El objetivo a mediano y largo plazo es determinar las pautas de variación de los niveles de productividad del ecosistema (primaria, secundaria y bentónica) en sus diferentes ambientes, y los mecanismos de acoplamiento físico-biológico que regulan dichos procesos productivos.

Patrones y control de la dinámica del agua, carbono y nutrientes. A partir de un monitoreo ininterrumpido de la dinámica de la masa de agua costera y de plataforma continental, que se prolonga ya por más de una década, se tiene un conocimiento importante de la dinámica oceanográfica estacional e interanual (Filonov *et al.*, 1996, 1998a, 1998b, 2000; Filonov, 1999, 2000; Filonov & Konyaev, 2006). El objetivo a largo plazo es continuar con el monitoreo de la estructura de la masa de agua, corrientes y nutrientes, así como desarrollar modelos tridimensionales que permitan la mejor comprensión de los procesos físicos y biológicos que ocurren en la región. En ambientes estuarinos y costeros, se ha realizado la modelación del hidrodinamismo de la laguna de Barra de Navidad, y se conocen las pautas de variabilidad asociadas a los ciclos estacionales y lunares. Este conocimiento sirve como base para estudiar los mecanismos que explican el aporte y retención larvario, así como los patrones de distribución espacial del zooplancton y el asentamiento postlarvario de especies de camarones comerciales. A largo plazo se pretende automatizar algunos procesos de monitoreo de la dinámica ambiental de la laguna.

El papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Desde 1992 se realizan muestreos orientados a conocer la dinámica de las comunidades de peces demersales de fondos blandos y costeros de fondos rocosos (Aguilar-Palomino *et al.*, 1996, 2001; Godínez-Domínguez *et al.*, 2000; Lucano-Ramírez *et al.*, 2001; Rojo-Vázquez *et al.*, 2001a), invertebrados bentónicos (Landa-Jaime *et al.*, 1997, 1998; Godínez-Domínguez, 2003), ictioplancton y otros

grupos del zooplancton (Franco-Gordo *et al.*, 1999, 2003, 2004; Suárez-Morales *et al.*, 2000; Siordia-Cermeño *et al.*, 2003) y aves playeras y marinas (Hernández-Vázquez *et al.*, 1999, 2002, 2005; Hernández-Vázquez, 2000; Hernández-Vázquez & Fernández, 1999; Hernández-Vázquez & Mellink, 2001). El objetivo a largo plazo es continuar con los monitoreos y consolidar los inventarios y colecciones biológicas, así como evaluar las pautas interanuales de variabilidad de la diversidad biológica.

Patrones y frecuencias de las perturbaciones en los ecosistemas. Las perturbaciones (naturales o inducidas por actividades humanas) cambian la dinámica de los ecosistemas y pueden afectar la biodiversidad y productividad. El conocimiento de los patrones y frecuencia de las perturbaciones es esencial en el manejo y conservación de los recursos naturales.

Desde 1994 se desarrollan proyectos para evaluar el impacto de la pesca y el deterioro de hábitats costeros, y actualmente se trabaja en discriminar los efectos de los impactos antropogénicos de otras fuentes de variabilidad natural como los cambios estacionales e interanuales en los ecosistemas. Desde 1994 se desarrollan proyectos para evaluar el impacto de la pesca en los ecosistemas y el deterioro de hábitats costeros, y recientemente se ha demostrado el efecto potencial de la pesca sobre las comunidades bentónicas de invertebrados (Godínez-Domínguez & Freire, 2003) y el ecosistema marino costero de la zona (Galván-Piña, 2005). Los resultados sugieren que los cambios detectados en algunos atributos del ecosistema guardan relación con la intensidad de la pesca y las características de las especies capturadas. La pesca de arrastre o camaronera en lo general es la que presenta un mayor efecto en la estructura trófica del ecosistema. Sin embargo, la pesca artesanal tiene mayor potencial de efecto en la función y organización del ecosistema, debido a que las especies sujetas a alta explotación pertenecen a los niveles tróficos más altos donde se regula el comportamiento y la dinámica del ecosistema.

Con el propósito de resultar útil para un manejo sustentable de los recursos pesqueros, es necesario mantener un conocimiento actualizado y representativo del comportamiento diná-

mico de los sistemas ecológicos de la zona. Bajo esta óptica, se pretende desarrollar un programa de monitoreo de larga duración que nos permita detectar indicadores de los efectos de la actividad pesquera y de fenómenos naturales, como El Niño-La Niña, discriminando la influencia antrópica de la variación natural, modelando la dinámica estacional e interanual, a través de la construcción de modelos de balance de masa tipo *Ecopath*, los cuales serán utilizados como base para la simulación de los impactos de la pesca.

5.6 Ecosistemas Costeros de la Península de Yucatán

5.6.1. Antecedentes

El grupo Ecosistemas Costeros de la Península de Yucatán (Ecopey) tiene su origen en el trabajo que han venido desarrollando varios investigadores en la zona costera del noroeste de la Península de Yucatán, un área notable por sus características ecológicas y la diversidad de su biota. En el área de estudios del grupo Ecopey se encuentran lagunas y dunas costeras, manglares, selvas bajas inundables y petenes, que forman un interesante mosaico de hábitats bien conservados; se encuentran también sabanas, áreas de uso agropecuario y centros de población. En la región se encuentran tres áreas protegidas: la Reserva Estatal El Palmar y la Reserva de la Biosfera Ría Celestún en el estado de Yucatán y la Reserva de la Biosfera de los Petenes en el norte del estado de Campeche. La diversidad de ambientes permite diseñar experimentos de largo plazo sobre los efectos de eventos naturales e impactos antrópicos sobre la estructura y funcionamiento de ecosistemas costeros. Por otra parte, Celestún es un sitio ideal para el estudio de largo plazo de los efectos de descargas del acuífero, ya que se ubica en la desembocadura más importante de la cuenca noroccidental de agua subterránea de la Península de Yucatán, coincidiendo con el llamado anillo de cenotes, y formando parte del corredor costero de humedales mejor conservados de la parte occidental de la Península de Yucatán.

El grupo Ecopey se constituyó a partir de la convocatoria de creación de la Red MEX-LTER,

con el propósito de fortalecer la colaboración y las líneas de investigación de profesores de los Departamentos de Recursos del Mar y de Ecología Humana del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida (Cinvestav-Mérida), que realizan estudios de largo plazo en ecosistemas costeros de Yucatán, y especialmente en la Reserva de la Biosfera Ría de Celestún (RBRC). A este grupo se han incorporado además investigadores de otras instituciones nacionales y extranjeras que durante varios años han colaborado con los investigadores del Cinvestav-Mérida. Estas instituciones incluyen el Distrito de Manejo del Agua del Sur de Florida (*South Florida Water Management District*, SFWMD), el Instituto de Biogeoquímica de Humedales (*Wetland Biogeochemistry Institute*) de la Universidad Estatal de Luisiana, y el Instituto de Parasitología de la República Checa. Uno de los objetivos principales del programa es el de incorporar al grupo otras instituciones nacionales que se encuentran realizando investigaciones en la zona costera de la Península de Yucatán, afines con las áreas temáticas de la investigación ecológica a largo plazo.

La visión general del grupo Ecopey es tener varios sitios de estudio, tanto costeros como del interior, que caractericen los gradientes ambientales únicos de la unidad geomorfológica cárstica que forma la Península de Yucatán.

Los integrantes del Cinvestav-Mérida han realizado investigaciones ecológicas y sociales en Celestún desde inicios de la década de 1980, motivados por la importancia de la zona para la conservación de la naturaleza y la importancia socio-económica de sus recursos naturales. Celestún, por ejemplo, es un área prioritaria para la conservación de aves residentes y migratorias, de las que se han registrado más de 300 (Semarnat, 2002) y entre las cuales se encuentran las poblaciones más grandes de la región del flamenco (*Phoenicopterus ruber ruber*); esta área fue decretada como Zona de Refugio Faunístico desde 1979; posteriormente, dado el buen estado de conservación de los humedales costeros que incluyen una de las dos zonas más importantes de manglares del norte de Yucatán, fue declarada Reserva Especial de la Biosfera, con

una extensión de 59,130 ha. En el año 2000 se actualizó su poligonal, incluyendo una zona marina, con lo que esta área protegida como reserva de la biosfera comprende actualmente 81,482 ha (Semarnat, 2002) y actualmente tiene una designación internacional como parte de la Red de Reservas de la Biosfera de MAB-UNESCO, además de ser un sitio Ramsar desde 2004. La importancia ecológica de Celestún ha sido reconocida también por la asociación civil Ducks Unlimited de México (DUMAC), que estableció en el área una estación de campo.

El trabajo del grupo de investigadores de Ecopey ha consistido en la generación y sistematización de información para la elaboración y actualización del programa de manejo de la RBRC. Este programa de manejo se ha desarrollado a través de inventarios de biodiversidad y la caracterización de las condiciones físico-geográficas y sociales de la región, así como del desarrollo de varias líneas de investigación que cubren diversos aspectos de ecología y manejo de recursos naturales en ecosistemas costeros tropicales como lagunas costeras, manglares, zona marina, playas y vegetación acuática sumergida, entre otras. Los investigadores de Ecopey han participado activamente en actividades de conservación y manejo de recursos naturales, y colaboran estrechamente con la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) y otras dependencias gubernamentales. También colaboran con organizaciones civiles interesadas en la conservación y mantienen una amplia red de colaboración con instituciones de investigación de México y otros países. Como parte del Cinvestav, la mayoría de los investigadores participan en actividades docentes a nivel de postgrado.

Celestún es uno de los sitios de estudio incluidos en una propuesta de investigación ecológica a largo plazo a escala de la región del mar Caribe, en la cual se observan signos de degradación ambiental debido al impacto derivado de actividades humanas como la pesca, el turismo, la modificación de la hidrología, las descargas de contaminantes, etc.; la vulnerabilidad de los ecosistemas de la región implica la necesidad de una estrategia de investigación que informe y fundamente acciones de manejo y conservación (Rivera-Monroy *et al.*, 2004).

5.6.2. Sitios de trabajo

El grupo trabaja principalmente en la RBRC y áreas adyacentes de los estados de Yucatán y Campeche, en la planicie continental de la costa noroeste de la Península de Yucatán; como límites relevantes destacan compartir la representatividad de los ecosistemas típicos de la región, al sur con la Reserva de la Biosfera Los Petenes y al norte con la Reserva Estatal de El Palmar. Celestún y Los Petenes forman parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de México y, desde 2000, de la convención Ramsar de humedales prioritarios. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, Celestún se localiza en la Región Hidrológica XII; de acuerdo con la Conabio la región es considerada prioritaria tanto desde el punto de vista hidrológico como de diversidad marina y terrestre, y es además un AICA o área prioritaria para la conservación de las aves (Arriaga *et al.*, 2009).

El área de la RBRC comprende una zona costera de suelo cárstico, sin accidentes topográficos, relativamente plana, con una altura promedio sobre el nivel del mar de 3 m. El área, que tiene una gran variedad de ecosistemas incluyen manglares, petenes, una amplia laguna costera, dunas con vegetación costera, playas, camas de vegetación acuática sumergida y una amplia plataforma en la zona marina, además de manantiales y salinas, es notable por su diversidad biológica; para la RBRC se han reportado más de 549 especies de plantas vasculares terrestres y unas 460 especies de vertebrados terrestres. Está pendiente la actualización de la diversidad biológica acuática; sin embargo, se reconocen actualmente 150 especies de fitoplancton, 32 grupos taxonómicos de zooplancton, 320 especies de macrofauna, 101 especies de meiofauna y 140 especies de peces (Semarnat, 2002).

El área ofrece excelentes condiciones para el estudio de la hidrodinámica costera y su relación con el transporte sedimentario que determinan en gran medida la configuración de las playas y sus tendencias erosivas o acumulativas; estos procesos son de interés ya sea por los servicios ecológicos que presta Celestún, como la conservación de las especies de tortugas marinas o por su gran demanda como sitio de esparcimiento y

posibilidades de desarrollo económico a través del turismo. Su ubicación costera es excelente para determinar los efectos del cambio climático reflejados en el incremento del nivel medio del mar sobre los humedales de manglar y playas.

El proyecto de la RBRC tiene como objetivos la conservación de la diversidad biológica de ecosistemas costeros de manglar, petenes, dunas costera, vegetación acuática sumergida, y el mantenimiento de los procesos ecológicos de los que depende la generación de servicios ambientales que benefician a pobladores locales, regionales y visitantes nacionales e internacionales, además de impulsar los procesos de gestión ambiental y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales como base para el desarrollo de las comunidades locales (Semarnat, 2002). Es interés de Ecopey generar información y participar en estrecha colaboración con otros actores sociales, para entender los procesos ecológicos y sociales clave que apoyen modelos de manejo basados en la mejor información técnica-científica posible.

5.6.3. Líneas de investigación

Dinámica del agua, carbono y nutrientes. Este tema es el que ha tenido mayor desarrollo en la RBRC. A este respecto, el trabajo se centra en la laguna costera, el principal cuerpo de agua de la RBRC. Se inició a través de la caracterización de variables físicas y químicas del agua, como respuesta a la demanda de conocer el potencial de acuicultura en la laguna, y el nivel de contaminación bacteriológica. A partir de 1986 se ha venido realizando el monitoreo hidrológico de variables físico-químicas e indicadores de eutrofización, y se ha evaluado la respuesta generada por eventos como los huracanes (Herrera-Silveira, 1993). El proyecto tiene la perspectiva de desarrollar estudios de balance hidrológico, dispersión de contaminantes, así como variaciones espaciales y temporales del metabolismo del ecosistema.

Productividad primaria en los ecosistemas. El trabajo de este tema ha sido desarrollado tanto en la laguna costera como en los manglares. En la laguna costera se inició a la par con el estudio de las características del agua de la laguna desde 1986, utilizando la concentración de clorofila-a

como indicador del potencial de productividad primaria de la columna de agua (Herrera-Silveira, 1994). El proyecto tiene la perspectiva de realizar estudios de las características clave en la variabilidad espacial y cambios espaciales de la productividad primaria y su relación con la productividad secundaria. En el caso del manglar se ha evaluado la productividad de los diferentes tipos de bosques que bordean la laguna a través de la colecta de hojarasca desde 2000 (Zaldívar, 2004). El proyecto tiene la perspectiva de realizar estudios de la productividad de raíces, y las variables que determinan sus variaciones espaciales y temporales, así como el papel que esta productividad tiene en la dinámica del suelo y su respuesta al incremento del nivel medio del mar.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Este tema incluye actualmente estudios de diversidad de fitoplancton y parásitos de moluscos. Se cuenta con inventarios de otros grupos como zooplancton, invertebrados bentónicos de vida libre, peces, aves, vegetación acuática sumergida, pero no hay actualmente programas de monitoreo bien establecidos de estos grupos. Este proyecto tiene la perspectiva de realizar estudios dirigidos a: 1. Entender cómo cambian la estructura y la composición de especies de los ecosistemas a través de gradientes ecológicos en diferentes escalas espaciales y temporales, 2. Cuáles son los efectos de perturbaciones naturales y antropogénicas y de prácticas de manejo sobre la biodiversidad y los procesos poblacionales y 3. Qué variables bióticas sirven de indicadores de la integridad biótica del ecosistema, así como la identificación de las variables abióticas que se relacionan con dichos cambios.

Patrones y frecuencia de perturbaciones. Los trabajos que se llevan a cabo dentro de este tema tienen por objeto caracterizar el régimen histórico de perturbaciones naturales y antropogénicas en los bosques de manglar y determinar las respuestas espacio-temporales de la vegetación a los efectos de las perturbaciones, a escala del paisaje (Liceaga *et al.*, 2006) y en los procesos de regeneración y sucesión (Alonso, 2006; Teutli, 2006), generando conocimiento aplicable a la conservación de especies y hábitats, que apoyen la restauración ecológica, principalmente

en los manglares (Herrera-Silveira *et al.*, 2005). Recientemente y con la colaboración de Pronatura-Yucatán se ha iniciado el monitoreo de la morfología del componente playa a través de mediciones de perfiles. Los principales factores de perturbación estudiados son los huracanes y el cambio de usos del suelo para desarrollo urbano, ganadería y agricultura. Los métodos de investigación incluyen el uso de imágenes de satélite y fotografía aérea de fechas múltiples, monitoreo de parcelas permanentes y el registro de perturbaciones. Este proyecto tiene la perspectiva de hacer estudios dirigidos sobre los efectos que la intensidad y frecuencia de huracanes tiene sobre la productividad, regeneración y estructura del manglar, así como la dinámica de claros en el bosque.

Definición de criterios para el manejo y conservación de ecosistemas. Este es un tema central en el trabajo que realiza el grupo en colaboración con la Dirección de la RBRC (Conanp), con un enfoque de investigación-acción participativa. Se abordan diferentes líneas de trabajo, una relacionada con el manejo de recursos naturales, como la pesca de camarón (Defeo *et al.*, 2005), y otra sobre la puesta en práctica de acciones de rehabilitación de zonas de manglar degradadas (Herrera-Silveira *et al.*, 2005). Otros intereses se centran en los aprovechamientos de la biodiversidad y las playas con fines turísticos y sobre el mantenimiento de hábitat para el anidamiento de las tortugas marinas. La planificación del manejo de áreas protegidas debe fundamentarse en principios ecológicos, la participación local y arreglos institucionales duraderos, para generar efectos positivos que puedan ser evaluados a través de sistemas de indicadores tales como la recuperación de cobertura vegetal, la restauración de hábitats amenazados (por ejemplo manglares y vegetación de dunas costeras), la regeneración y crecimiento de las especies que se aprovechan e índices bióticos de integridad ecológica y calidad del agua. Los métodos de estudio consisten en la planificación, seguimiento y evaluación de programas de manejo y ordenamientos territoriales comunitarios, utilizando criterios e indicadores de sustentabilidad ecológica, económica y social, monitoreo de cambio en el uso y cobertura del suelo, y documentación de las acciones de

manejo. Sobre esta última línea y las necesidades de información y conocimiento, se reconoce la necesidad de establecer líneas específicas de los aspectos socio-económicos, incluyendo la cultura y la legislación. Cabe mencionar la información de base que existe sobre procesos socioeconómicos y culturales que ocurren en el puerto de Celestún, destacando el de la industria local de producción de harina de pescado (Fraga *et al.*, 1986), la inmigración humana al puerto de Celestún (Fraga, 1993), el crecimiento infantil y juvenil (Dickinson *et al.*, 1989, 1990; Murguía *et al.*, 1991), las actitudes de la población local hacia los recursos naturales (Méndez-Contreras, 2004) y la forma en que las relaciones sociales locales inciden en el uso de estos recursos (Robles de Benito, 2005). El propósito de esta línea de investigación es documentar la forma en que se hace uso de los recursos naturales en la RBRC y sus efectos sobre el estado biológico de la población humana que reside en ella. En los trabajos realizados se integra el conocimiento generado en los otros temas de investigación ecológica de largo plazo.

5.7. Gracilis

5.7.1. Antecedentes

El grupo está integrado por los miembros de la Red Gracilis (Grupo Regional en Pastizales Mexicanos para su Investigación y Liderazgo de su Uso Sustentable; véase www.ipicyt.edu.mx/GRACILIS/). Se formó para promover la investigación y conservación del bioma de pastizal semiárido en México. El nombre del grupo corresponde al de la especie más característica de los pastizales semiáridos de nuestro país, *Bouteloua gracilis*. Los pastizales naturales de los altiplanos semiáridos constituyen ecosistemas amenazados, con características muy particulares, que sostienen las actividades ganaderas y han sido prácticamente relegados en las políticas y acciones de conservación, aunque tienen antecedentes de investigación que se remontan a finales de la década de 1950 con el establecimiento de varias estaciones de investigación de lo que ahora es el INIFAP (Instituto Nacional de

Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; véanse antecedentes en www.ipicyt.edu.mx/GRACILIS/).

Los pastizales semiáridos de México están caracterizados por el predominio de gramíneas entre las cuales el género *Bouteloa* y la especie *B. gracilis* son los componentes más comunes, aunque también son importantes las compuestas o asteráceas, la familia con mayor diversidad de especies de México (Challenger & Soberón, 1998); pueden aparecer también elementos leñosos arbustivos o arbóreos dispersos. La dominancia de pastizales en su área de distribución parece estar determinada por la influencia combinada de las condiciones climáticas y edáficas, además de factores como el fuego y el impacto de grandes herbívoros. En el pasado estos pastizales fueron el hábitat de grandes manadas de bisontes y berrendos, sustituidos posteriormente por el ganado doméstico. Los pastizales están amenazados por un conjunto de factores como el sobrepastoreo y la conversión de los pastizales naturales a pastizales inducidos o cultivados y a campos agrícolas, así como la invasión de matorrales cuando se ha suprimido el fuego. Los pastizales pueden incluirse entre los ecosistemas más amenazados del país, a pesar de lo cual han recibido muy poca atención por parte de los conservacionistas. La distribución potencial de pastizales naturales se ha estimado en 18.7 millones de hectáreas; su superficie actual es de unas 12.3 millones de hectáreas, de las cuales cerca de la mitad se consideran alteradas (Challenger & Soberón, 2009). En contraste, los pastizales inducidos cubren 6.3 millones de hectáreas distribuidas en diferentes ecorregiones del país.

El grupo Gracilis de la Red MEX-LTER incluye a investigadores que han desarrollado monitoreo o estudios a largo plazo en varios sitios del país como la Reserva Ecológica de Montecillos (pastizal halófito) en el Estado de México, la reserva ecológica de la Universidad Juárez en Gómez Palacio, Durango, y los campos experimental de INIFAP de Vaquerías en Jalisco, de Zacatecas en el estado del mismo nombre y de La Campana en Chihuahua. Cada sitio comenzó independientemente el monitoreo; actualmente cuentan con registros de hasta 40 años. Eventualmente con la conformación de la red Gracilis, los gru-

pos han tratado de realizar investigación a largo plazo y de tipo experimental utilizando el gradiente latitudinal de distribución de pastizales que se extiende unos 1,300 km desde el norte al centro de México, a fin de responder a preguntas ecológicas de alcance regional.

5.7.2. Sitios de trabajo

Cuatro sitios se encuentran establecidos en vegetación de pastizal mediano. Los sitios están localizados a lo largo del bioma de pastizal semiárido que se extiende desde el norte del estado de Chihuahua, hasta la subprovincia geográfica de los Llanos de Ojuelos en el noreste de Jalisco. De esta manera los sitios LTER del grupo Gracilis se localizan de la siguiente manera: uno en la subprovincia geográfica de los Llanos de Ojuelos, otro en las planicies de Zacatecas, otro más en los pastizales semiáridos del centro de Durango y otro más en los pastizales del centro de Chihuahua. Todos exhiben una vegetación de pastizal semiárido dominado por gramíneas cortas del género *Bouteloua*. La topografía se caracteriza por llanuras, mientras los suelos predominantes están clasificados como xerosol háplico asociado a litosol y xerosol háplico asociado con litosol y planosol éutrico; estos suelos son someros (menos de 50 cm de profundidad) y están limitados por un estrato de induración (caliche o tepetate), presentando texturas arcillo-limosa o limosa-arcillosa. El tipo de uso histórico ha sido de pastoreo, aunque existen algunas áreas donde se realizó agricultura de temporal.

El grupo Gracilis también incluye sitios en vegetación de pastizal halófito, uno enclavado en la cuenca endorreica del ex Lago de Texcoco, en la localidad de Montecillo, Estado de México, donde la especie dominante es *Distichlis spicata*, y el otro sitio se encuentra en cuencas cerradas del centro de Chihuahua, con *Sporobolus airoides* como especie importante.

Otros dos sitios incluyen pastizal amacollado; uno se encuentra enclavado en el piedemonte de la Sierra Fría, en el estado de Aguascalientes y pertenece a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. La vegetación predominante es un pastizal amaco-

llado con *Bouteloua curtipendula* y *Heteropogon contortus*, como los elementos predominantes. La topografía es de terrenos con pendiente moderada y suelos someros con gran pedregosidad. El otro sitio de pastizal amacollado se encuentra en la zona central de Chihuahua, igualmente localizado en la transición de bosque de encino y pastizal mediano, con *Bouteloua curtipendula* como elemento más característico.

5.7.3. Líneas de investigación

Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. En lo que respecta a esta área temática existen registros de hasta 24 años en pastizal semiárido en el sitio de Ojuelos, Jalisco, y en el pastizal halófito en la reserva ecológica de Montecillos. Aunque existen algunas discontinuidades en los registros, las evaluaciones son anuales en ambos sitios. El resto de los sitios realiza evaluaciones anuales o bianuales al menos desde hace 10 años. El objetivo de esta área temática es examinar las variaciones en la productividad primaria neta (PPN), relacionadas con variaciones climáticas. Para esto, en cada uno de los sitios se cuenta con una estación meteorológica, la cual permite establecer la relación entre productividad de los sitios y las variaciones climáticas, que se han registrado en trabajos como el de Aguado-Santacruz y García-Moya (1998) y Aguado-Santacruz *et al.* (2002).

Patrones y control de la dinámica del agua, carbono y nutrientes. Los cambios en el tipo de uso de suelo de la vegetación de pastizal natural incluyen la conversión a terreno agrícola, cambio en los regímenes de pastoreo y cambio en los regímenes de fuego; esto ha causado transformaciones importantes en la vegetación y, a su vez, en la dinámica de agua, carbono y nutrientes. En esta área temática las actividades actuales se centran en la cuantificación de almacenes de carbono y nitrógeno en los sitios de pastizal semiárido. A la fecha se cuenta con información sobre contenidos de materia orgánica y nutrientes (Aguado-Santacruz & García-Moya, 1998), además de una base de datos.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Se han realizado diversas aproximaciones, primero para conocer

la diversidad biológica de los pastizales y segundo para evaluar su importancia en el funcionamiento de los ecosistemas. En el primer caso, se tienen colecciones botánicas de los sitios de Chihuahua y Ojuelos, las cuales albergan casi 4,000 especímenes de especies vasculares. Se cuenta también con inventarios faunísticos de aves para la región de los Llanos de Ojuelos. Para examinar el papel de la diversidad de las especies en el funcionamiento del pastizal actualmente se mantiene un monitoreo de la dinámica del agua en suelo bajo diferentes ensamblajes vegetales.

Definición de criterios para el manejo y conservación de los ecosistemas. La definición de criterios para el manejo y conservación del ecosistema de pastizal que realiza el grupo Gracilis, involucra la comparación del impacto en el funcionamiento del ecosistema de pastizal de diferentes tipos de uso de suelo. En particular, se examinan los papeles de los regímenes de fuego y los regímenes contrastantes de pastoreo como factores determinantes para la conservación de pastizales.

Otras áreas temáticas que se están desarrollando dentro de la red Gracilis incluyen la del efecto del cambio climático, para lo cual se estableció una estación de *eddy* covarianza en el sitio de los Llanos de Ojuelos. Se pretende examinar flujos de carbono, agua y energía en sitios de pastizal semiárido y contribuir al conocimiento de balances de carbono, agua y energía.

5.8. Los Tuxtlas

5.8.1. Antecedentes

La Estación de Biología de Los Tuxtlas (González-Soriano *et al.*, 1997), establecida en 1967 por la Universidad Nacional Autónoma de México, a cargo del Instituto de Biología, ha sido un sitio de investigación en el cual se generaron algunos de los primeros estudios integrales sobre la ecología de las selvas tropicales húmedas de México (Gómez-Pompa *et al.*, 1976; Gómez-Pompa & Del Amo, 1985). Por estas razones, Los Tuxtlas es uno de los sitios de investigación de la Red MEX-LTER con una historia más larga y sostenida de investigación. A pesar de ello, la investigación

se ha realizado mediante esfuerzos individuales, con proyectos dirigidos por investigadores de diferentes instituciones nacionales y extranjeras. El grupo de Los Tuxtlas se conformó a partir de la convocatoria de la Red MEX-LTER, con un grupo de investigadores pequeño si consideramos la gran diversidad de personal que trabaja actualmente en la zona.

En sus inicios, la investigación de Los Tuxtlas estuvo centrada casi completamente en estudios taxonómicos y en proyectos que se dieron a la tarea de completar los inventarios de la flora y fauna de la zona. Aun cuando en este lugar de alta diversidad biológica los inventarios están todavía incompletos para muchos de los grupos biológicos, los más importantes se encuentran prácticamente concluidos, lo que hace a Los Tuxtlas un sitio ideal para la investigación biológica y ecológica. La segunda fase de investigación en Los Tuxtlas ha abordado trabajos de tipo ecológico, donde se ha pretendido entender la dinámica y funcionamiento de la selva alta perennifolia a partir de diferentes enfoques y usando como modelo distintos grupos biológicos. Una síntesis de la investigación en el área se encuentra en el libro de González-Soriano *et al.* (1997).

Las instituciones que hoy tienen mayor presencia en la zona son el Instituto de Biología, el Instituto de Ecología, la Facultad de Ciencias y el Centro de Investigación en Ecosistemas de la UNAM, el Instituto de Ecología AC de Xalapa y la Universidad Veracruzana, aunque de manera muy constante existe la participación de investigadores de muchas otras universidades de México y del mundo. El trabajo que se ha realizado en Los Tuxtlas ha generado más de 1,200 publicaciones. Las investigaciones hasta ahora concluidas en Los Tuxtlas son muy diversas y heterogéneas, por lo que uno de los retos más importantes del grupo LTER Los Tuxtlas es reunir a la mayor cantidad de investigadores interesados para hacer un esfuerzo mayor común y conducir la investigación a largo plazo en la región.

Aunque de manera muy errática, en Los Tuxtlas ya existe investigación a mediano y largo plazo. Por ejemplo, se ha tenido un seguimiento muy detallado de la influencia de las actividades humanas en la destrucción y fragmentación de la zona. Desde el inicio de la colonización de la re-

gión de Los Tuxtlas, la selva continua se ha reducido hasta 5% de su extensión original, y 20% se resguarda en un paisaje fragmentado (Guevara *et al.*, 2004). Debido al impacto humano en la región, Los Tuxtlas se ha convertido en un laboratorio por excelencia para entender los patrones de destrucción y fragmentación de la selva y sus implicaciones en la ecología y la conservación. Por otro lado, también ha proporcionado un laboratorio para estudiar y poner en práctica programas de restauración ecológica, en el marco de una problemática social regional importante que marca un reto para estructurar un nuevo orden sociedad-naturaleza.

5.8.2. Sitios de trabajo

Los trabajos en Los Tuxtlas se concentran principalmente en la Estación de Biología Tropical "Los Tuxtlas" del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La Estación de Los Tuxtlas se ubica sobre la carretera Catemaco-Monte Pío en el municipio de San Andrés Tuxtla, Veracruz, México, entre los 95° 04' y 95° 09' longitud oeste y los 18°34' y 18° 36' de latitud norte. La zona de reserva asociada a la estación consta de 644 hectáreas de bosque primario de selva alta perennifolia que se conecta con el macizo continuo de vegetación contigua que se extiende sobre el volcán de San Martín. La estación opera desde hace 40 años y es internacionalmente reconocida como uno de los sitios con mayor investigación en ecología de selvas en el mundo.

Además de la reserva de la Estación de Los Tuxtlas, se han realizado programas de investigación en varios de los fragmentos cercanos que mantienen ecosistemas razonablemente conservados y otros muy perturbados. Entre los fragmentos se encuentran principalmente el Cerro del Borrego y Playa Escondida. También son motivo de estudios algunos cuerpos de agua mayores, como las lagunas Escondida y Zacatal (esta última dentro de la estación), y el río Maquinas. Recientemente el estudio de la ecología de potreros y acahuales adyacentes ha sido importante.

El clima en el área de la estación es cálido-húmedo, con una temperatura promedio máxi-

ma de 27.3°C y mínima de 21.5°C. La precipitación anual es de más de 4,500 mm, con una marcada época de secas (de marzo a mayo) y una época de “nortes” con vientos fríos y húmedos (de septiembre a febrero) que pueden hacer bajar la temperatura de la zona hasta los 10°C. Actualmente los datos climáticos de la estación en tiempo real se pueden solicitar directamente en la jefatura de la misma.

La región de Los Tuxtlas ocupa una extensión aproximadamente de 90 km de largo por 50 km de ancho de terreno accidentado formando la llamada Sierra de Los Tuxtlas que comprende tres volcanes principalmente: San Martín (con una altura de 1,700 m, a las faldas del cual se ubica la estación), Santa Marta y San Martín Pa-japan. El Cerro del Vigía, dentro de los terrenos de la estación, tiene una altura de 530 m. Los terrenos de la estación están casi totalmente ubicados sobre depósitos volcánicos cubiertos por suelos de tipo latosoles de migajón arcilloso, moreno rojizos, de pH ligeramente ácido y de profundidad variable, y las rocas basálticas afloran sobre todo en sitios con pendiente fuerte donde los suelos son someros.

Los desagües pluviales hacia el Golfo de México se llevan a cabo a través de la laguna el Ostión y la laguna de Sontecomapan, localizadas al sur del volcán de San Martín. Al norte, los principales ríos y arroyos son los ríos Máquina, Col, de Cañas y el Arroyo de Lisa; y al sureste el Río Grande de San Andrés, originado en el Lago de Catemaco. La estación cuenta con diferentes nacimientos de agua y arroyos en su parte baja que desembocan a los ríos Maquina, Balzapote y hacia La Perla.

Actualmente la estación posee una infraestructura muy variada, que brinda a los investigadores una estancia muy agradable. Cuenta con 20 habitaciones de una o dos camas, cocina y comedor, un laboratorio general compartido, laboratorios asociados, herbario y colecciones faunísticas de referencia, biblioteca, aula, vivero con riego y una estación meteorológica. Entre su personal académico asociado figuran dos investigadores y tres técnicos académicos residentes de tiempo completo.

5.8.3. Líneas de investigación

Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. Dentro del área temática de productividad primaria se han realizado estimaciones sobre la caída de hojarasca y la productividad primaria neta de la selva (Sánchez & Álvarez-Sánchez, 1995; Sánchez-Gallen & Álvarez-Sánchez, 1996), además de varios estudios sobre la estructura de la vegetación al interior o al borde de la misma. También ha sido interés del grupo realizar investigaciones sobre el proceso de descomposición, teniendo ya determinaciones sobre los cambios en la masa remanente y en el cambio de la proporción carbono/nitrógeno tanto para el componente foliar, como para el tejido leñoso y los troncos en el suelo (Álvarez-Sánchez & Becerra-Enríquez, 1996; Barajas-Guzmán & Álvarez-Sánchez, 2003). Se ha avanzado sustancialmente en el análisis de los cambios de la meso y macrofauna edáfica asociados a la descomposición de tejido foliar y leñoso en distintos ambientes del paisaje derivados de la selva húmeda, haciendo énfasis en el caso de las termitas. El proyecto pretende entender las diferencias de la estructura de la vegetación, biomasa y la productividad primaria neta entre la zona de borde y las zonas no perturbadas; la influencia de la calidad del mantillo en el secuestro de carbono y su posible uso en estudios de restauración; describir la diversidad de la fauna del suelo que desintegra al mantillo, estimar la velocidad de descomposición de la fracción leñosa del mantillo, la tasa respiratoria de las termitas que desintegran la fracción leñosa del mantillo y la concentración de carbono, fósforo y nitrógeno en los subsistemas suelo, mantillo y vegetación.

Se considera conveniente tener a futuro información de la estructura, composición y biomasa de la vegetación en distintos componentes del paisaje, como fragmentos de distintos tamaños, otros tipos de vegetación y diferentes usos del suelo. Se prevé realizar estimaciones de los almacenes de carbono y estudios de secuestro de carbono. En el caso de la descomposición, se contempla realizar experimentos donde se ma-

nipule la calidad del recurso y varios grupos de la fauna desintegradora.

Dinámica del agua, carbono y nutrientes. Dentro de esta área temática se ha participado activamente en el proyecto “Demandas hidrológicas de los ecosistemas naturales en México: Fase 1”, el cual se realiza en conjunto con otros sitios pertenecientes a la MEX-LTER. A partir del análisis de la información de la estación climática de la Estación de Biología, se han determinado las variaciones históricas de la temperatura y precipitación, y sobre esos datos se han hecho estimaciones de los componentes del balance hídrico para la cuenca en la que está inmersa la propia estación.

Por otra parte, se han realizado estudios sobre la pérdida de nutrientes a lo largo del proceso de descomposición, el efecto que tiene la palma *Astrocaryum mexicanum* en la deposición del nitrógeno mineral, y se sabe de manera precisa la dinámica del carbono, nitrógeno y fósforo en los acervos de la vegetación y el suelo en bosques secundarios de la zona, aspecto muy importante para poder conocer los efectos de la deforestación en la pérdida de los nutrientes (Hughes *et al.*, 1999).

El papel de la biodiversidad en la estructura y función de los ecosistemas. Los estudios sobre la biodiversidad en Los Tuxtlas van más allá de la generación de listados florísticos y faunísticos y han estado más que nada enfocados a los efectos de la dinámica natural de la selva y de los cambios antropogénicos sobre la diversidad. Los miembros ahora pertenecientes al grupo están involucrados en proyectos sobre florística, y en el estudio de diversos grupos como hongos micorrizógenos (Varela *et al.*, 2008), líquenes, insectos, peces, anfibios, reptiles (Urbina-Cardona *et al.*, 2006), aves y mamíferos, cubriendo un amplio espectro de la diversidad de la zona. Las actividades humanas han cambiado radicalmente la estructura de la selva en las últimas décadas, y estos cambios deben manifestarse en la composición, diversidad y abundancia de las especies vegetales y animales de Los Tuxtlas. Existen cinco proyectos mayores:

- Líquenes folícolas en bosques tropicales húmedos de México: modelos para estudios

funcionales de la biodiversidad e indicadores de perturbaciones antropogénicas.

- Cambios en la diversidad de la ictiofauna dulceacuícola y estuarina de la región de Los Tuxtlas.
- Diversidad y ecología de anfibios y reptiles en ambientes fraccionados en selva tropical perennifolia en la región norte del Istmo de Tehuantepec.
- La fragmentación de la selva en Los Tuxtlas y la conservación de la biodiversidad: mamíferos, aves, escarabajos coprófagos y hongos micorrizógenos arbusculares (HMA).
- Relaciones entre la biodiversidad de plántulas y la biodiversidad de HMA.

Los proyectos en general buscan entender a largo plazo los cambios en parámetros de ecología de comunidades por medio de gradientes altitudinales, de humedad y de perturbación. También pretenden reconocer si existen algunas especies más tolerantes a la perturbación que otras e identificar aquellas especies que sin duda son imprescindibles para detectar un ambiente selvático ya perturbado o un ambiente conservado. Para el proyecto general es importante detectar cuáles son los parámetros físicos y químicos ambientales que determinan la distribución de las especies en paisajes tanto conservados como modificados, y comprender qué tipo de interacciones bióticas (entre plantas, plantas vs. animales o entre animales) son necesarios para mantener la armonía en el funcionamiento de una selva conservada.

Establecer estimadores de perturbación y de ambientes plenamente conservados provee herramientas para poder hacer planeación sobre programas de restauración de selvas. Hoy por hoy, no existen parámetros fehacientes sobre cómo es que una selva bien conservada debe lucir en todos sus elementos faunísticos y florísticos así como en sus interacciones. No se sabe con certeza cuál es el punto final que debe alcanzar una selva para considerarse restaurada.

Delimitar la alteración real causada por los grupos humanos a los diferentes gremios de especies de distintos grupos taxonómicos es un objetivo imperante dentro del área temática de la biodiversidad. Estos estudios involucran el efecto de

la deforestación como tal, de la urbanización, del uso de pesticidas o fertilizantes, de la introducción de especies exóticas tanto de plantas como de animales y los monocultivos, entre otros.

Los estudios de zonas contiguas a la selva conservada son fundamentales para el entendimiento de los cambios en la composición de la biodiversidad, tanto en tierra como en agua. Para ello ha sido necesario extender los estudios no solamente a zonas prístinas sino también a zonas con un diverso grado de deterioro, de degradación, fragmentación o destrucción, y también con diferentes grados de regeneración. Para entender la dinámica de las selvas alteradas, se han abordado temas tales como los efectos de borde en los diferentes grupos taxonómicos o gremios de cada grupo, cuál es el funcionamiento de los corredores biológicos en la dispersión y mantenimiento genético de las poblaciones aisladas en remanentes, y cuáles son las respuestas conductuales, demográficas o de interacción entre especies. El objetivo último de estos trabajos es entender qué tipos de paisajes con influencia antropogénica pueden sostener una máxima diversidad biológica y una pérdida mínima de especies y qué servicios ecosistémicos y económicos puede generar la conservación de la biodiversidad para la población local.

Los estudios que se han venido realizando en Los Tuxtlas involucran tanto ambientes terrestres como acuáticos. Los Tuxtlas tiene la peculiaridad de guardar un número grande de especies endémicas locales y regionales que permiten establecer evaluaciones específicas sobre el estatus de conservación de cada una de las especies de distribución restringida. Los listados de la NOM-059 son un excelente marco de referencia para este propósito.

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. La caída natural de árboles constituye un factor de perturbación en el ecosistema de bosque tropical perennifolio como el que existe en Los Tuxtlas (Martínez-Ramos, 1994). El sobrepeso de epifitas y lianas sobre los árboles del dosel, asociado con tormentas severas, vientos fuertes, relámpagos y enfermedades promueven que ramas grandes y árboles completos caigan, formando claros en el dosel del bosque. Aunque la mayoría de los claros son

de pequeña extensión, estudios previos realizados en la zona han permitido determinar que algunos llegan a cubrir más de una hectárea como producto de la caída simultánea de varios árboles grandes. La frecuencia de caída de árboles y tamaño de los claros formados varía incluso entre localidades, dependiendo de la topografía del terreno, el patrón de vientos y precipitación, la carga de epifitas y lianas, así como de la composición de especies de la comunidad arbórea. La apertura de claros es crucial para la renovación del bosque ya que genera ambientes ricos en luz, de mayor temperatura ambiental y, posiblemente, de mayor disponibilidad de agua y recursos del suelo. Investigaciones han permitido determinar que estas perturbaciones naturales favorecen la emergencia y desarrollo de plantas heliófilas y estimulan pulsos de crecimiento acelerado de las plántulas y plantas que se encuentran en el sotobosque y el dosel. Estos pulsos de crecimiento permiten que la mayoría de los árboles del dosel medio y alto avancen en su desarrollo hacia estadios reproductivos. Globalmente, la caída de árboles, la formación de claros y los cambios ambientales y ecológicos subsecuentes, generan un proceso de sucesión cíclica a través del cual el bosque se renueva, incluyendo la biomasa vegetal y animal. Este ciclo de renovación ocurre en un periodo de rotación, definido como el tiempo transcurrido entre la formación de un claro y otro en un mismo lugar. Para el bosque de Los Tuxtlas se ha estimado una tasa de recambio de entre 50 y 67 años. Recientemente, se ha detectado una tendencia de aumento en la velocidad de crecimiento de los árboles, en la abundancia de lianas y un cambio en la composición de especies arbóreas en los bosques tropicales perennifolios a nivel mundial. Se ha propuesto que dicho incremento en la dinámica de estos bosques está relacionado con el fenómeno de cambio global, en particular con el aumento en la concentración de CO₂ y temperatura media ambiental. En este contexto, el estudio de la perturbación por la caída de árboles, la formación de claros y la dinámica del ecosistema asociada a este régimen de perturbación cobra un interés central en las investigaciones ecológicas de largo plazo para el sitio Los Tuxtlas.

El cambio climático y los ecosistemas terrestres. Los anillos de crecimiento de especies ar-

bóreas se han convertido en recurso valioso para entender la dinámica climática a largo plazo en muchas zonas del globo. Estos estudios son importantes en regiones donde los registros climáticos son cortos y donde son limitados los registros paleoclimáticos (Ricker *et al.*, 2007). En la actualidad existen cronologías para diversas especies arbóreas del norte y centro del país (*Pinus*, *Pseudotsuga*, *Taxodium*). La mayoría de las cronologías generadas para especies del género *Pinus* y *Pseudotsuga* se encuentra en sitios de alta montaña (≥ 2500 msnm) en la Sierra Madre Oriental y Occidental. Estas cronologías responden principalmente a la precipitación de invierno-primavera, modulada por el fenómeno de El Niño. Por otro lado, se han generado en sitios de baja altitud algunas cronologías para la especie *Taxodium mucronatum*, las cuales responden principalmente a la precipitación de verano. Existen estudios en diferentes partes del mundo donde se ha reportado potencial dendroclimático en diversas especies arbóreas tropicales por presentar anillos de crecimiento conspicuos. Utilizando algunas de estas especies, se han realizado reconstrucciones climáticas. En México no se han realizado estudios dendroclimáticos con especies de la selva alta perennifolia, aunque en algunas regiones para algunas especies se espera que pronto sea posible.

Para responder tales preguntas se requiere conocer si algunas de las especies arbóreas encontradas en Los Tuxtlas forman anillos anuales de crecimiento. De haberlas, se puede conocer si existe variación en una escala de tiempo de cientos de años en la temperatura como en las zonas de alta montaña en México; con la implementación de esta técnica, incluso se puede captar alguna señal climática diferente a las ya conocidas en las especies de selva tropical de la región de Los Tuxtlas.

Objetivos a largo plazo planteados en esta área temática son establecer el potencial dendroclimático de especies tropicales en la región de Los Tuxtlas, hacer la proyección a largo plazo de las curvas de crecimiento de especies arbóreas sin anillos de crecimiento en función de factores ambientales (climáticos), establecer la respuesta climática del crecimiento de especies arbóreas con anillos anuales de crecimiento en

el noreste de México y hacer la comparación con la región de Los Tuxtlas.

5.9. Mapimí

5.9.1. Antecedentes

Este grupo tiene como lugar de trabajo la región árida del Bolsón de Mapimí en los límites de Durango, Chihuahua y Coahuila. El área no sólo es representativa de la porción meridional de una de las grandes extensiones áridas de Norteamérica, el desierto chihuahuense, sino que además en ella se asienta la Reserva de la Biosfera de Mapimí, emblemática por ser la primera reserva de este tipo en México y una de las primeras establecidas en el mundo, con un enfoque de trabajo en el cual se incorporaron explícitamente objetivos de investigación y monitoreo (Halffter, 1981, 1988). A mediados de los años setenta, bajo la dirección de Gonzalo Halffter, se iniciaron los trabajos de investigación en el área y se creó la infraestructura del Laboratorio del Desierto, como parte del Instituto de Ecología AC.

Mapimí ha sido también uno de los principales sitios de investigación ecológica en zonas áridas. Su relación con la investigación ecológica a largo plazo se inició desde 1994, cuando se realizó en la reserva una reunión con investigadores estadounidenses de la Red LTER de los Estados Unidos. Esta reunión tuvo como propósito identificar proyectos de investigación conjuntos con la Universidad de Nuevo México en Albuquerque, para evaluar los patrones del impacto de los cambios climáticos sobre las comunidades del desierto chihuahuense. Desde 1997 este estudio se realiza en Mapimí paralelamente a otros sitios de Nuevo México, La Jornada del Muerto y la Estación de Vida Silvestre de Sevilla. Se pretende con ello identificar patrones o diferencias latitudinales en el desierto chihuahuense en cuanto a las respuestas de las comunidades de mamíferos y de plantas debidos a los cambios climáticos. Integrantes del grupo de investigación de Mapimí se incorporaron al proceso que condujo a la creación de la Red MEX-LTER que ha sido relatado en el capítulo 3.

5.9.2. Sitio de trabajo

La Reserva de la Biosfera Mapimí (RBM) es un área representativa de la región del Bolsón de Mapimí, que tiene una extensión de 342,387 ha. Se ubica en el límite donde se unen los estados norteños de Chihuahua, Coahuila y Durango, en la parte central del desierto chihuahuense. Está conformada por llanuras desérticas en cuencas endorreicas, denominadas bolsones, localizadas a elevaciones entre los 1,000 y 1,200 m; en medio de estas llanuras sobresalen algunas elevaciones de cerros y pequeñas serranías de origen volcánico y sedimentario. Un rasgo geográfico característico del Bolsón de Mapimí consiste en la presencia de formaciones arenosas que llegan a ocupar grandes superficies cubiertas por dunas o extensas planicies de arena, como es el caso de la parte norte de la RBM. La precipitación media anual en el área es de 264 mm, con una máxima de 512 mm, una mínima de 80 mm y un promedio anual de 40 días de lluvia. La evaporación anual promedio es de 2,504 mm. Las precipitaciones de verano, de junio a septiembre, representan 71% del total anual. Las lluvias de invierno, de diciembre a febrero, representan 9% mostrando gran variabilidad interanual en su distribución. La temperatura media anual es de 20.8°C, que corresponde a un clima cálido seco con una fuerte variación estacional, con rangos que varían de una mínima de 3.9°C en el mes de enero (mes más frío) a una máxima de 37.4°C en junio. El clima se caracteriza por sus fuertes amplitudes térmicas tanto diurnas como anuales. Los suelos son minerales, muy pobres en materia orgánica y muy básicos (pH mayores de 7.5); predominan los suelos del tipo regosol en zonas de cerros y pies de montes, del tipo gipsisol y calsisol en zonas de bajadas y playas, con algunos manchones de suelos del tipo vertisol en las planicies bajas de la reserva (Breimer, 1988).

Los tipos de vegetación presentes son matorral xerófilo y pastizal halófilo. En la zona se han identificado 403 especies de plantas, de las cuales 31 son endémicas del desierto chihuahuense (García-Arévalo, 2002). De acuerdo a las agrupaciones de especies de plantas se han descrito siete asociaciones localizadas en varios sustratos: 1. Parte baja de la cuenca o playas, 2. Dunas

de yeso fósiles, 3. Dunas sobre planicies arenosas, 4. Partes bajas de los cerros de origen volcánico o bajadas, 5. Bajadas y sierras de origen calcáreo, 6. Zona de transición eólica-fluvial y 7. Las ubicadas sobre una meseta de basalto (Montaña & Breimer, 1988). Entre las especies más comunes están el mezquite (*Prosopis glandulosa* var. *torreyana*), la gobernadora (*Larrea tridentata*), el ocotillo (*Fouquieria splendens*), la yuca (*Yucca rigida*), el maguey (*Agave asperrima*), el nopal rastrero (*Opuntia rastrera*) y los pastos de toboso (*Pleuraphis mutica*). En relación a la fauna hay 270 especies de vertebrados, de las cuales cinco especies son de anfibios, 39 de reptiles, 28 de mamíferos y 201 de aves.

Desde el punto de vista humano, históricamente la zona fue ocupada por grupos nómadas de Amerindios (cocoyomes, tobosos), posteriormente el sitio fue habitado por apaches y esporádicamente por comanches (Hernández *et al.*, 2001). No hubo asentamientos humanos de europeos en la zona, habiendo ocupado éstos sólo la periferia del Bolsón de Mapimí en puntos como el Real de Minas de Mapimí, y las zonas de lo que actualmente es Torreón, Coahuila, y Gómez Palacio, Durango. Hasta mediados del siglo XIX el área fue utilizada para fines ganaderos de equinos, primero, y posteriormente de bovinos (Hernández *et al.*, 1996). La población censada en la Reserva de la Biosfera de Mapimí y donde están incluidas las zonas experimentales del sitio LTER es de 353 personas. Esta población en su mayoría aprovecha la vegetación de la zona a través de la ganadería de equinos y bovinos y un grupo localizado en la región noroeste de la Reserva se dedica a la extracción de sal (Grünberger *et al.*, 2004).

5.9.3. Líneas de investigación

Productividad primaria. Desde 1996 se evalúa el efecto de la herbivoría de mamíferos en la productividad primaria en una zona de pastizal de toboso y otra de matorral de gobernadora. Para ello se instalaron experimentos en parcelas de exclusión, con jaulas (36 m por lado), utilizando un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro tratamientos (no bovinos, no bovinos y no lagomorfos, no bovinos, no lagomorfos y no

roedores, y control). Dentro de cada exclusión se monitorea bianualmente 36 áreas fijas de 1 m² por exclusión y sitio. En cada una de estas áreas se tienen registros de las especies vegetales, la cobertura aérea de cada especie y la altura máxima. Con esta información se estimará la productividad vegetal en cada tratamiento y en cada ambiente (matorral y pastizal).

Dinámica del agua, carbono y nutrientes. El grupo Mapimí ha desarrollado trabajos de investigación con el propósito de entender los procesos ecológicos que se desarrollan al interior de un ecosistema representativo del desierto chihuahuense. Un tema importante ha sido el monitoreo del clima para conocer particularmente la variabilidad temporal y espacial de la lluvia, y otra cuestión importante ha sido el estudio del funcionamiento hidro-edafológico del sistema, que ha comprendido la descripción e identificación del suelo, las costras superficiales y sus propiedades hidrológicas.

Respecto a la dinámica del agua, de 1987 a 1992 se caracterizó anualmente el comportamiento hidrodinámico a escala de cuenca, sobre una toposecuencia en el paisaje (cerro, pie de monte y bajadas). Los resultados reflejan un gradiente de escurrimiento ascendente desde el cerro hasta la zona de bajadas y una producción de sedimentos más importante en pie de monte y bajada inferior. A partir de 1996, se reubicaron 10 pluviómetros para dar seguimiento de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en matorral y pastizal (10 pluviómetros en una superficie de 8 km²). Los resultados de 1996 y 1997 muestran que la distribución espacial y temporal de la lluvia se presentó de forma más importante en matorral que en pastizal.

En cuanto a carbono y nutrientes, durante 1987-1992, se describió el suelo de una forma muy fina en la zona de bajadas en la cuenca de El General, usando las metodologías convencionales de suelos. Se determinaron los análisis físico-químicos más importantes en la zona de bajada y transición del pie de monte-bajada. El trabajo relacionado a estados de superficie del suelo se centra en el monitoreo permanente iniciado en 1996, de los cambios físicos y la calidad orgánica de los suelos superficiales por efecto de la variación climática y los herbívoros

del sitio LTER-Mapimí. Los resultados muestran que el suelo es de tipo mineral, reflejándose una calidad orgánica ligeramente más importante en pastizal que en matorral. Las costras dominantes en matorral son gruesas y en pastizal de tipo decantación asociada a criptógamas.

A escala de una cuenca de 15 km², donde se incluyen los experimentos de herbivoría antes descritos, se diferenciaron los principales rasgos geológico-edáficos y se determinó su geología y los principales tipos de suelos a una profundidad de 2m. En esta área también se describieron y determinaron los estados de superficie del suelo (costras, elementos gruesos como gravas, arenas y rocas), y se estimaron los almacenes de carbono orgánico para los primeros 15 cm de profundidad de suelo (Bartolino, 1988; Delhoume, 1997; Janeau, 1992). Además, se han definido los regímenes espaciales y temporales pluviométricos del sitio a través de una red de pluviómetros totalizadores y de pluviógrafos de balancín (Cornet, 1988; Delhoume, 1997). La variabilidad estacional y temporal de la precipitación se ha medido desde hace 30 años en una estación de clima de la CNA, y desde 1997, a través de una red de 10 pluviómetros totalizadores distribuidos en una zona de 10 km².

A través de determinación de las propiedades hidrológicas del suelo se identificó un gradiente altitudinal y geomorfológico ascendente en términos de producción de escurrimiento y sedimentos que se extiende desde la región alta del cerro hasta la zona de playa, pasando por pies de monte y la zona de bajadas (Grunberger *et al.*, 2005; Delhoume, 1997). También se han evaluado las propiedades hidrológicas en formaciones particulares del paisaje denominado “playa” y en algunas zonas de formaciones vegetales específicas como mogotes, polígonos de *Suaeda* y pastizales de *Pleuraphis mutica* y *Sporobolus airoides* (Reyes-Gómez, 1995; Reyes-Gómez *et al.*, 1996; Grünberger, *et al.*, 2005); se sabe cuáles son las tasas de producción de escurrimiento y sedimento a través de una topo-secuencia de estudio mediante parcelas de erosión y escurrimiento y la relación de la interfase lluvia-suelo-vegetación-escurrimiento-sedimentos (Martínez-Ochoa, 2007; Viramontes-Pereida, 1992).

Actualmente, sólo existen trabajos aislados y parciales en tiempo y en espacio sobre la dinámica del carbono y los nutrientes del ecosistema (Delhoume, 1997; Reyes-Gómez, 2005). En términos de calidad orgánica del suelo se está colectando suelo cada cinco años a una profundidad de 30 cm sobre transectos de 200 metros con puntos de muestreo al azar. A una muestra compuesta se le determina carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio para evaluar su variación con respecto a la salinidad. No se ha determinado la dinámica de nutrientes y carbono a escala anual hasta el momento, tampoco se ha implementado una estrategia para un seguimiento continuo. Estos procesos biogeoquímicos serán evaluados por el grupo Mapimí en un lapso no mayor de dos años, por lo que se está desarrollando un proyecto para iniciar de forma ininterrumpida el monitoreo del ciclo del carbono y los principales nutrientes del sistema en la interfase atmósfera-suelo-agua-plantas-fauna.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. En el área se han desarrollado diferentes trabajos sobre ecología de comunidades y poblaciones de plantas y animales. Entre estos trabajos se tiene el propósito de caracterizar la comunidad de roedores y su variación a través del tiempo en la zona de matorral y pastizal. El estudio inició en 1996 y se continúa hasta la fecha. Los resultados de este estudio muestran que la disponibilidad del recurso tiene un impacto en la densidad y estructura de la comunidad de roedores en el desierto chihuahuense. Cada año, la cantidad de lluvia recibida influye en los niveles de la productividad primaria en los diferentes hábitats (Hernández *et al.*, 2005). Estos niveles de productividad son una base para las subsecuentes interacciones ecológicas como competencia, depredación, etc. (Hernández *et al.*, 2002). Obviamente impactos antrópicos que afecten la productividad de biomasa —como el pastoreo de animales domésticos— pueden tener impactos similares sobre la comunidad de roedores. Esto subraya la importancia de este tipo de monitoreos en el largo plazo para entender las interacciones entre el clima, los animales salvajes y las actividades humanas

Efecto del cambio climático en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. El trabajo en esta línea se dirige a evaluar el efecto de fenómenos climáticos (El Niño) en la densidad de lagomorfos en el desierto chihuahuense. En este estudio se evalúan los cambios en la abundancia de lagomorfos (*Lepus californicus* y *Sylvilagus auduboni*) en la zona de matorral y pastizal y el efecto del clima en estas poblaciones. El estudio se realiza desde 1997 a la fecha. En general, los resultados indican que los cambios en las abundancias están relacionados con las precipitaciones y no con la cantidad de carnívoros (Marín *et al.*, 2003).

Evaluar el efecto de la variación en las condiciones climáticas por fenómenos como El Niño, sobre la estructura de las comunidades vegetales en el desierto chihuahuense, es un tema que se ha venido trabajando desde 1996, iniciando con la colecta e identificación de las plantas. Los resultados obtenidos durante los primeros ocho años de muestreo indican que hay una relación positiva en el aumento de la cobertura vegetal, relacionada con la precipitación acumulada, donde las coberturas del grupo de las herbáceas y gramíneas se incrementaron en la época de secas y de lluvias. Al parecer, existe un banco de semillas que requiere de niveles de lluvia mayores al promedio histórico para poder germinar (Martínez & López-Portillo, 2003). Es necesario continuar con el estudio para llegar a conclusiones contundentes sobre el efecto de los cambios climáticos en la biodiversidad.

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. Se trata de un área temática cuyo desarrollo está en proceso. Debido a las condiciones de aridez y las propias de los suelos, el área puede ser muy vulnerable a los impactos antropogénicos. Las actividades económicas predominantes son la ganadería extensiva, la explotación de sal del acuífero de Palomas y muy escasamente la explotación de especies vegetales silvestres y la agricultura de riego y de temporal para autoconsumo (Barral, 1988; Kaus, 1993). El uso que se le da a la mayor parte de las tierras dentro de la reserva es el apacentamiento de ganado bovino; de esta actividad dependen poco más de un centenar de personas. Se ha determinado que la presión que ejerce la ganadería ex-

tensiva va de alta (menos de 20 ha por cabeza), moderada (20 hectáreas por cabeza) a baja (70 hectáreas por cabeza) de un predio a otro dentro de la reserva (Semarnat, 2006; Barral, 1988). Resultados de estudios realizados en 1996 sobre el impacto de algunas prácticas agrícolas indican que los suelos de cultivos, después del abandono, son repoblados por vegetación natural circundante en un periodo promedio de 30 años (Vital-Rumebe & Grünberger, 2005). Las actividades alternativas de bajo impacto sobre el medio ambiente son: la explotación de especies desérticas no maderables como la lechuguilla para fibra, la candelilla para cera, el mezquite para leña y carbón, y la producción de sal proveniente de la salmuera del acuífero de Palomas, que emerge en la parte más baja de la playa baja de la zona (Liot & Grünberger, 2005). Estas actividades económicas alternativas serán reforzadas con una iniciativa que se está generando a partir de 2007, sobre investigación-acción-participación local, entre el grupo Mapimí, la Conanp y la Universidad de Santa Clara, California.

Otro de los aspectos importantes que el grupo de investigación abordará es el impacto de la actividad antropogénica de los núcleos periféricos de población, como es el caso de la Comarca Lagunera. También se planea evaluar fuentes distantes de contaminantes: sustancias tóxicas persistentes y bioacumulables generados en diferentes regiones distantes de la reserva. Su influencia mayor sería a través del transporte de contaminantes a la zona a través del aire y agua, así como el aporte natural de contaminantes de la zona al ambiente por los diferentes medios (aire, agua). Para conocer estos aspectos y su grado de influencia se planteó introducir como aspecto inicial la caracterización de la calidad del aire, agua y suelo de la zona, así como continuar con el monitoreo de indicadores ambientales. Esta caracterización, en asociación con los estudios meteorológicos y físicos específicos de la zona permitirá asociar los diferentes patrones de comportamiento de contaminantes, así como el transporte de los mismos, y analizar su posible grado de influencia en el comportamiento de los diferentes ecosistemas.

5.10. Sierra de Manantlán

5.10.1. Antecedentes

El grupo Manantlán de la Red MEX-LTER tiene su origen a mediados de la década de 1980, como parte del desarrollo de un proyecto de conservación de una zona montañosa localizada en los límites de los estados de Jalisco y Colima, la Sierra de Manantlán. Este proceso condujo simultáneamente a la formación de un centro de investigación, el establecimiento de una estación de campo de la Universidad de Guadalajara, la creación de una reserva de la biosfera y, posteriormente, la ampliación del trabajo a un área más extensa, la cuenca del río Ayuquila.

En 1977 el descubrimiento de un pariente silvestre del maíz, el teocintle o milpilla *Zea diploperennis* (Iltis *et al.*, 1979), atrajo la atención sobre la Sierra de Manantlán; investigadores de la Universidad de Guadalajara y la Universidad de Wisconsin iniciaron trabajos de inventario de la flora y la fauna que pusieron en evidencia la riqueza biológica de la región y llevaron a proponer la creación de un área protegida. En 1984 el gobierno de Jalisco adquirió un predio de 1,245 ha en la parte centro-oeste de la sierra y lo entregó en comodato a la Universidad de Guadalajara para establecer allí una estación de campo, la Estación Científica Las Joyas (ECLJ), donde se ha trabajado de manera continua durante más de dos décadas (Santana *et al.*, 2004). En 1985 en la Universidad de Guadalajara se decidió crear un “laboratorio” dedicado no sólo a la investigación en el campo de la ecología y el manejo de recursos naturales, sino a impulsar acciones de conservación vinculadas con el desarrollo socioeconómico en la sierra (Santana *et al.*, 1989); con el tiempo esta dependencia universitaria se convirtió en el Instituto Manantlán de Ecología y Conservación de la Biodiversidad (Imecbio), cuya sede desde 1988 es la región de influencia de la Sierra de Manantlán; actualmente forma parte del Centro Universitario de la Costa Sur, la unidad regional de la Universidad de Guadalajara localizada en la ciudad de Autlán.

El Imecbio organizó su trabajo a través de un proceso de planificación estratégica y evaluación periódica, dirigiendo sus esfuerzos a

promover la conservación de la Sierra de Manantlán, adoptando el modelo de reservas de la biosfera de MAB-UNESCO (Jardel, 1992). En 1987 se decretó el establecimiento de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, que un año después se incorporó a la red internacional de reservas MAB. En los seis años siguientes al decreto, el Imecbio llenó el vacío institucional existente por la falta de presencia gubernamental en la gestión del área protegida, involucrándose no sólo en la investigación, sino también en actividades de asesoría técnica en las comunidades agrarias, promoción de acciones de conservación, concertación interinstitucional y educación ambiental (Jardel *et al.*, 2004d). Al crearse en 1993 la dirección de la RBSM, como agencia del gobierno federal responsable del área protegida (actualmente dependiente de la Conanp), se estableció una estrecha colaboración con el Imecbio que permitió avances significativos en el proyecto de conservación (Graf *et al.*, 1995, 2003). Las acciones de investigación se ampliaron hacia la cuenca media del río Ayuquila-Armería, dentro de la cual se encuentran dos tercios de la RBSM (Santana *et al.*, 1993). Con el tiempo se logró impulsar la creación de una “iniciativa intermunicipal para la gestión ambiental” en la cuenca, una asociación de diez municipios, que finalmente crearon su propia agencia ambiental intermunicipal¹⁸ (Graf *et al.*, 2006). El trabajo colaborativo de un centro de investigación universitario con la agencia federal responsable de una reserva de la biosfera, una agencia ambiental de una asociación regional de municipios y las comunidades agrarias de la región, es un caso poco común e innovador que ha sido considerado como un ejemplo exitoso de vinculación de la investigación con el manejo (Castillo, 2000; Castillo & Toledo, 2000).

El Imecbio impulsó la participación de investigadores de otras instituciones científicas nacionales y extranjeras en la RBSM y la cuenca del río Ayuquila, integrando un grupo que ha mantenido la colaboración durante varios años. Actualmente el grupo Manantlán de la Red

MEX-LTER está formado por investigadores del Imecbio, otras unidades de la Universidad de Guadalajara, el Instituto de Ecología AC, el Instituto de Biología y el Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la UNAM, la Universidad de Wisconsin-Madison y la Escuela de Recursos Forestales de la Universidad de Washington. El hecho de que la mayor parte de los integrantes del grupo formen parte de universidades públicas, ha permitido vincular la investigación con la enseñanza e incorporar estudiantes de licenciatura y postgrado en su trabajo.

Los temas de investigación del grupo Manantlán fueron definidos primeramente en función de las necesidades de información y conocimiento para el manejo de la RBSM y la gestión ambiental en la cuenca del río Ayuquila. El objetivo general del grupo es generar conocimiento aplicado para la conservación, aprovechamiento sostenible y restauración de ecosistemas naturales y manejados en la región de la Sierra de Manantlán y la cuenca del río Ayuquila.

5.10.2. Sitios de trabajo

El área principal de trabajo ha sido históricamente la RBSM, un área protegida con una superficie de 139,570 ha, ubicada en los límites de los estados de Jalisco y Colima (19°25'-19°45' N- 103°45'-104°30' O), cuya importancia para la conservación radica en su diversidad de ecosistemas y especies, y en el papel que desempeñan sus bosques en la protección de cabeceras de cuencas que abastecen de agua a una región poblada por cerca de 400,000 habitantes (Jardel, 1992).

Con un gradiente de elevación de los 350 a los 2860 msnm, en la RBSM se presenta la transición de las selvas bajas y medianas de las partes bajas (<1000 msnm) a bosques de encino, mesófilo de montaña, pino y oyamel de las zonas altas, característica de las montañas mexicanas. La variación en el sustrato geológico, la geomorfología y los suelos, junto con una larga historia de influencia humana a través de la agricultura, la ganadería, las actividades forestales y el uso del fuego, han contribuido a la heterogeneidad del paisaje (Jardel *et al.*, 1996). En el área se han registrado cerca de 3,000 especies de plantas vasculares y 560 especies de vertebrados y existe

18. La Junta Intermunicipal de Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Cuenca Baja del Río Ayuquila, organismo público descentralizado, creado en 2008.

además un importante componente de la biodiversidad representado por los recursos genéticos de cultivos tradicionales y sus parientes silvestres (Vázquez *et al.*, 1995; INE, 2000).

La Sierra de Manantlán tiene una población de 32,000 habitantes y su territorio pertenece a 33 comunidades agrarias y alrededor de 80 predios privados (INE, 2000). Al igual que en otras zonas montañosas, predominan condiciones de marginación y pobreza, así como conflictos agrarios estrechamente relacionadas con procesos de transformación del paisaje y presión sobre los recursos naturales (Jardel, 1998; Jardel *et al.*, 1996; Graf *et al.*, 2003). El área protegida se estableció sobre los terrenos de comunidades indígenas, ejidos y propietarios particulares, imponiendo un régimen especial de manejo basado en una zonificación que incluye zonas núcleo de protección estricta y zonas de amortiguamiento donde se permiten actividades agrícolas, ganaderas, forestales y de ecoturismo, bajo principios de sustentabilidad establecidos en un programa de manejo (INE, 2000). La limitación de dominio impuesta por el decreto de reserva y su programa de manejo, se justifica en función del interés público, para conservar la biodiversidad y mantener los ecosistemas que generan servicios ambientales para la sociedad. Esto implica a su vez la obligación de la sociedad de compensar a los dueños y poseedores de la tierra y de apoyarlos en la tarea de conservar los ecosistemas y aprovechar de manera sostenible los recursos naturales (Graf *et al.*, 2003; Jardel *et al.*, 2004d). Por lo tanto, ha sido un objetivo explícito de la estrategia de conservación de la RBSM que las comunidades locales sean beneficiarias directas de la existencia del área protegida (Jardel, 1992; INE, 2000). La gestión de la RBSM debe basarse en el manejo comunitario del territorio y los recursos, a través de arreglos institucionales duraderos y mecanismos para la gobernanza y la resolución de conflictos, donde participen acompañando el proceso las dependencias gubernamentales, los centros de investigación y educación, y las organizaciones civiles relacionadas con la conservación y el desarrollo rural (Graf *et al.*, 2003). Dentro de este esquema, la investigación y la educación juegan un papel estratégico para el manejo de la reserva, articulando la conserva-

ción con el ensayo de alternativas de aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, con un enfoque de manejo adaptativo (Jardel *et al.*, 2004d). Sin embargo, la implementación de este enfoque en la práctica ha enfrentado las secuelas de los conflictos agrarios persistentes en la región y, en muchos casos, la falta de acciones gubernamentales realmente comprometidas con la resolución de los problemas.

El trabajo en la región de influencia o zona de transición de las reservas de la biosfera es un componente integral de su enfoque original (Battiste, 1986). El límite noreste y este de la RBSM, a lo largo de 71 km, está formado por el río Ayuquila, y 57% del área protegida se encuentra dentro de los límites de su cuenca, que cubre una superficie de 986,400 ha en los estados de Jalisco y Colima (Graf *et al.*, 2006). El Ayuquila es el principal ecosistema fluvial de la RBSM, y es el hábitat de 29 especies de peces, de las cuales dos son endémicas, nueve especies de crustáceos acuáticos y poblaciones de la nutria *Lontra longicaudis* (Santana *et al.*, 1993; Lyons *et al.*, 1995).

La porción central de la cuenca del río Ayuquila se encuentra dentro de la región de influencia de la RBSM y tanto el uso del agua en los centros de población y la agricultura como la descarga de contaminantes afectan la conservación del ecosistema fluvial y el bienestar de las poblaciones humanas ribereñas (Santana *et al.*, 1993; Martínez-Rivera *et al.*, 2000). A principios de 1990 se comenzó a trabajar con las comunidades aledañas al río sobre el problema de la contaminación generada por un ingenio azucarero y las ciudades de Autlán y El Grullo. El monitoreo hidrológico y de calidad de agua, los inventarios de biodiversidad, los estudios de caracterización del área y la participación en gestiones para atender el problema de las descargas contaminantes del ingenio y las ciudades, así como promover el control de desechos sólidos a través de su reutilización y reciclaje, condujeron a formar una asociación entre 10 municipios de la cuenca (que cubren un área de 410,000 ha, poblada por 136,000 habitantes), la Iniciativa Intermunicipal para la Gestión Integral de la Cuenca del Río Ayuquila (IIGICRA), que luego dio lugar a una junta intermunicipal cuyo propósito es fortalecer las capacidades de los municipios para

atender aspectos tales como el ordenamiento ecológico del territorio, la mitigación de impacto ambiental, la restauración ecológica, la creación y manejo de áreas protegidas municipales, el manejo y protección de bosques, la educación ambiental, el mejoramiento de servicios públicos municipales como el abastecimiento de agua potable, la disposición de desechos sólidos y el control de la contaminación (Graf *et al.*, 2006). La investigación ecológica a largo plazo aporta información y conocimiento para apoyar la gestión de la cuenca.

5.10.3. Líneas de investigación

Dinámica del agua, carbono y nutrientes. El trabajo en este tema se centra en la cuenca media del río Ayuquila-Armería. Se inició a través de inventarios de la fauna acuática (Lyons *et al.*, 1995) y como respuesta a la demanda local para evaluar las consecuencias de la contaminación generada por las descargas de aguas residuales de las ciudades vecinas y la industria azucarera (Santana *et al.*, 1993). El trabajo se centra en la cuenca media del río Ayuquila y se inició en 1995 con el monitoreo hidrológico y de calidad de agua (Martínez-Rivera *et al.*, 2000), como respuesta a la demanda local para evaluar las consecuencias de la contaminación generada por las descargas de aguas residuales de las ciudades vecinas y las industrias azucarera y mezcalera. Hasta ahora se ha monitoreado mensualmente el flujo hidrológico, variables fisicoquímicas e indicadores bióticos de calidad de agua, y se han evaluado los cambios generados por las medidas de control de las descargas contaminantes (Martínez-Rivera *et al.*, 2000), así como los cambios en cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca (Cárdenas & Martínez-Rivera, 2001). El proyecto tiene la perspectiva de desarrollar estudios de erosión y escurrimiento en microcuencas. En colaboración con los otros grupos de la Red MEX-LTER se participa en un proyecto de ecohidrología para evaluar la demanda hidrológica de diferentes tipos de ecosistemas incluidos en los sitios de estudio de la red.

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Este tema es el que ha tenido mayor desarrollo en la Sierra de

Manantlán, y se inició en 1977 con los trabajos de exploración botánica y zoológica en el área, que continuaron con inventarios biológicos sistemáticos a partir de 1985. Actualmente se desarrollan cinco proyectos de largo plazo sobre patrones de diversidad y dinámica de comunidades a través de gradientes ambientales y de perturbación en comunidades de plantas (Vázquez *et al.*, 1995; Cuevas y Jardel, 2004), aves (Santana, 2000), murciélagos y roedores (Iñiguez y Santana, 1993) y escarabajos (García-Real y Rivera-Cervantes, 1998; Rivera-Cervantes y García-Real, 1998), e indicadores bióticos de calidad de agua en el río Ayuquila-Armería (Lyons *et al.*, 1995; Henne *et al.*, 2002; Weigel *et al.*, 2002). El propósito de esta línea de investigación es entender cómo cambian la estructura y la composición de especies de los ecosistemas a través de gradientes ecológicos en diferentes escalas espaciales y temporales, cuáles son los efectos de perturbaciones naturales y antropogénicas y de intervenciones de manejo sobre la biodiversidad y los procesos poblacionales, y qué parámetros bióticos sirven de indicadores de la integridad biótica de ecosistemas terrestres y acuáticos

Patrones y frecuencia de perturbaciones. Los trabajos que se llevan a cabo dentro de este tema tienen por objeto caracterizar el régimen histórico de perturbaciones naturales y antropogénicas en los bosques del área de estudio, y determinar las respuestas de la vegetación a los efectos de las perturbaciones a escala espacial (paisaje, rodales) y temporal (regeneración y sucesión), generando conocimiento aplicable a la conservación de especies y hábitat, la silvicultura y la restauración ecológica, principalmente en bosques de pino, encino, oyamel y mesófilo de montaña (Jardel, 1991, 2004a, 2004b; Saldaña, 2000). Los principales factores de perturbación estudiados son los incendios forestales y el aprovechamiento de madera. Los métodos de investigación incluyen el uso de imágenes de satélite y fotografía aérea de fechas múltiples, técnicas dendrocronológicas, reconstrucción de la historia del manejo forestal en la región a través de entrevistas e investigación documental, monitoreo de parcelas permanentes, registro de perturbaciones, caracterización y cuantificación de las camas de combustibles como base de informa-

ción para modelos de comportamiento del fuego (con estudios comparativos en Sierra de Arteaga en Coahuila y la Selva El Ocote en Chiapas; Alvarado *et al.*, 2008; Michel-Fuentes, 2010), seguimiento a programas de manejo forestal en terrenos de la RBSM y aplicación experimental de quemas prescritas y tratamientos silvícolas. El trabajo de investigación sobre ecología y manejo del fuego ha tenido un fuerte impulso en los últimos diez años; se ha desarrollado un sistema de información y monitoreo de incendios forestales, en el cual se mantienen registros desde 1995 de la localización y extensión de los incendios en la RBSM; a partir de 2001, los polígonos de por lo menos 80% de los incendios son delimitados en campo y anualmente se actualizan los informes estadísticos al respecto (Castillo *et al.*, 2003; Balcázar, 2011). Otros temas de estudio sobre ecología y manejo del fuego incluyen la caracterización de regímenes de incendios, quemas prescritas experimentales, efectos del fuego sobre la diversidad florística y procesos de regeneración y sucesión en áreas afectadas por incendios (Jardel *et al.*, 2006b, 2009; Castillo 2008, Llamas *et al.*, 2009; Vargas-Jaramillo, 2010).

Definición de criterios para el manejo y conservación de ecosistemas. Este es un tema central en el trabajo que realiza el grupo en colaboración con la Dirección de la RBSM (Conanp), los municipios de la región, la Junta Intermunicipal (JIRA) y las comunidades locales, con un enfoque de investigación-acción participativa. Se abordan dos líneas de trabajo, una relacionada con la puesta en práctica del programa de manejo de la RBSM (Jardel, 1992; INE, 2000) y la otra con la gestión de la cuenca del río Ayuquila (Martínez-Rivera *et al.*, 2000; Graf *et al.*, 2003, 2006). La planificación del manejo de áreas protegidas y cuencas, fundamentada en principios ecológicos y basada en la participación local y en arreglos institucionales duraderos, genera efectos positivos que pueden ser evaluados a través de sistemas de indicadores tales como la recuperación de cobertura forestal y la restauración de hábitats amenazados como los bosques de pino y mesófilo de montaña (Jardel, 2008) y ecosistemas ribereños, la regeneración y crecimiento de las especies forestales sometidas a aprovechamiento, e índices bióticos de integridad eco-

lógica y calidad del agua (Santana *et al.*, 1993; Lyons *et al.*, 1995; Henne *et al.*, 2002; Weigel *et al.*, 2002). Los métodos de estudio consisten en la planificación, seguimiento y evaluación de planes de manejo y ordenamientos territoriales comunitarios, utilizando criterios e indicadores de sustentabilidad ecológica, económica y social, técnicas de evaluación rural participativa, monitoreo de cambio en el uso y cobertura del suelo, y documentación de las acciones de manejo. En los trabajos realizados se integra el conocimiento generado en los otros temas de investigación ecológica de largo plazo.

Otras líneas de investigación en desarrollo. Con el trabajo que se viene realizando existen las bases para desarrollar otros de los temas de investigación ecológica de largo plazo. Los sitios permanentes de los estudios sobre perturbaciones y sucesión (Jardel *et al.*, 2004c) y los de evaluación de combustibles forestales (Alvarado *et al.*, 2008; Michel-Fuentes, 2010; Morffin, 2010), cuentan con datos de estructura de la vegetación, crecimiento de árboles y biomasa de los estratos de vegetación, residuos leñosos gruesos y mantillo, que pueden servir como base para estudios de productividad primaria y dinámica de carbono y nutrientes en ecosistemas forestales. El monitoreo meteorológico, la información dendrocronológica y los estudios sobre régimen de incendios, así como estudios paleoecológicos (Figuroa-Rangel, 2008, 2009) se están relacionando con el tema de cambio climático. Se están llevando a cabo también estudios sobre patrones de cambio en la cobertura y uso del suelo y el efecto de la fragmentación sobre la biodiversidad (Cárdenas & Martínez-Rivera, 2001; Jardel, 2008; Farfán, 2009; Santiago-Pérez *et al.*, 2009), que servirán de base para desarrollar el tema de interacciones a nivel de interfase entre ecosistemas naturales y manejados. La investigación sobre temas sociológicos, conflictos agrarios y gobernanza en la gestión de áreas protegidas y cuencas (Jardel *et al.*, 1992; Gerritsen, 2002; Graf *et al.*, 2006) establecen las bases para el desarrollo de la investigación a largo plazo en el área temática de socioecología.

5.11. La Mancha

5.11.1. Antecedentes

El grupo La Mancha se formó con investigadores que desde hace mucho tiempo han realizado estudios en la zona costera La Mancha-El Llano, algunos desde el decenio de 1980. Esto permitió estructurar un grupo con un sólido conocimiento de los ecosistemas presentes y líneas de trabajo definidas que se incluyen de manera natural dentro de las áreas temáticas de la MEX-LTER. Por un lado, las líneas de trabajo están enfocadas a conocer la biología y ecología de especies particulares o de grupos funcionales, y los procesos en los cuales participan. Y por otro, se ha dado seguimiento a procesos de sucesión y regeneración de ecosistemas como la selva mediana, el sistema de dunas y los humedales. De tal forma que en conjunto se tengan elementos para la protección de los sistemas naturales y herramientas para su recuperación.

5.11.2. Sitio de trabajo

La zona de La Mancha se encuentra ubicada al final de la cuenca del río Actopan, y está directamente influenciada por las microcuencas La Mancha, El Farallón, El Llano y Agua Fría. Se ubica aproximadamente a 30 km de la ciudad José Cardel en dirección Noreste (km 27.5 carretera federal número 180 Cardel-Nautla), en el municipio de Actopan, Veracruz (19°30' N, 96°22' O).

La Mancha constituye el último refugio de selva mediana subcaducifolia creciendo en suelo arenoso en la vertiente del Golfo. Además, contiene otros importantes ecosistemas costeros como el manglar, el sistema de dunas, la selva baja, los arrecifes, un sistema de humedales y una laguna costera. Esta conjunción de sistemas naturales terrestres costeros, marinos y dulce acuícolas, produce una gran diversidad de flora y fauna, así como una complicada y frágil red de procesos ecológicos. Aunado a lo anterior, su situación geográfica la ubica dentro de una franja con una gran dinámica ambiental, debida a la estacionalidad marcada en la presencia de los vientos fríos del norte, del largo periodo seco y de la in-

tensa temporada de lluvias; esta última con la influencia de tormentas tropicales y huracanes. El clima de la zona es subhúmedo con lluvias en verano (899-1829 mm, junio-septiembre) y temporada seca en otoño-invierno (octubre-mayo) y temperatura media anual de 24-26°C.

A lo largo de su vida el sitio de La Mancha ha transitado de ser propiedad privada a la actual Estación de Investigaciones Costeras La Mancha (Cicolma) bajo la responsabilidad del Instituto de Ecología, AC (Inecol). La Mancha es reconocida como Área Privada de Protección (por el Gobierno del Estado de Veracruz), ha sido declarada como Humedal de Importancia Ecológica (Sitio Ramsar 1336, La Mancha y El Llano), y es sitio de paso y descanso de aves migratorias (principalmente rapaces diurnas).

Es la zona costera del Golfo de México más estudiada en el país. Desde hace más de 20 años diferentes instituciones (Inireb, UNAM, Inecol, UAM, etc.) han realizado estudios en la estación y las zonas aledañas. Muchas investigaciones, originalmente puntuales, son vigentes como estudios a largo plazo (v. gr., estabilización y sucesión del sistema de dunas, cambios en la estructura y composición del manglar, selva mediana subcaducifolia y acahual de selva, flujo de nutrientes, y dinámica poblacional de especies clave); y otras ya tienen ese carácter (v. gr., cambio climático, dinámica de la laguna costera, sucesión en potreros abandonados, restauración de humedales).

El Cicolma tiene infraestructura y seguridad básicas para realizar investigación a largo plazo. Cuenta con una estación meteorológica automatizada, un laboratorio con mesas de trabajo y un horno de secado, un aula para 15-20 personas, una cocina y comedor con capacidad para 30 personas, facilidades de hospedaje para 30 personas, invernaderos, una oficina administrativa y un sistema de veredas para acceso a los diferentes sistemas.

5.11.3. Líneas de investigación

Patrones y control de la productividad primaria en los ecosistemas. El mantenimiento de la fertilidad de los suelos tropicales se debe a la rápida circulación de nutrientes (Pragasán & Parthasarathy, 2005). Por ello, las tasas de caída y des-

composición de materia orgánica tienen gran importancia, sobre todo en los bosques tropicales estacionales. La temporalidad en la caída de hojarasca representa pulsos de entrada de recursos al sistema, que se reflejan en diferentes eventos del ciclo de vida de las plantas, como el crecimiento y la reproducción. En la estación La Mancha se presentan ecosistemas relativamente poco estudiados en el flujo de nutrientes, como son el manglar, la selva mediana subcaducifolia, la selva inundable y el humedal de popal y tular (Castillo-Campos & Medina, 2002). Los manglares son un ecosistema frágil que tiene gran importancia como fuente primaria de energía de organismos estuarinos (May, 1999).

En esta línea se pretende entender cuál es la estructura de las principales asociaciones vegetales, cuál es el aporte anual y la temporalidad en la caída de hojarasca y materia orgánica muerta en ellas, y si hay un patrón temporal en el crecimiento de los árboles debido a la marcada estacionalidad en el aporte de nutrientes en estos ambientes.

De 1977 a 1999 se mantuvo el registro mensual de la caída de hojarasca en 60 trampas dentro del manglar (Utrera-López y Moreno-Casasola, 2008). Actualmente se tienen 2 parcelas permanentes donde se han obtenido datos de crecimiento de 163 árboles de manglar marcados con placas de aluminio, desde 2002 (registro de datos semestral y anual). En la selva inundable de 2002 a 2007 se ha colectado mensualmente la hojarasca (Infante *et al.*, 2008; Infante, datos no publicados), y de 2007 a 2009 los registros han sido bimensuales (Moreno-Casasola, datos no publicados).

En la selva mediana se establecieron parcelas distribuidas en las diferentes condiciones de suelo (en la selva: selva joven y selva vieja) y orografía (en la selva y acahual: valles y crestas de las dunas). En cada parcela se registró la estructura de la vegetación (mediciones de altura, cobertura, densidad y área basal de los individuos >3.0 cm DAP). Cada individuo se marcó para darle seguimiento a los incrementos temporales de biomasa (altura, cobertura, DAP). Actualmente también se tienen parcelas en un acahual de selva, donde se han realizado evaluaciones del incremento en biomasa de las especies leñosas y cobertura de las

hierbas (escala Braun-Blanquet) que se ha registrado a los 3 y 8 años de inicio de la sucesión (Laborde *et al.*, datos no publicados).

Dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas. Las preguntas planteadas tienen que ver con la dinámica hidrológica y funcionamiento de dos tipos de humedales. Se pretende describir los cambios espacio-temporales en el nivel de inundación y las variables físico-químicas del agua y del suelo de un humedal de agua dulce, y cómo éstos se relacionan con la variación de la estructura y composición de las comunidades vegetales. Por otro lado, se quiere conocer cómo varía espacial y temporalmente la calidad del agua y la dinámica hidrológica en la laguna de La Mancha (tiempo de residencia del agua, patrones de circulación, descarga superficial, descarga subterránea, ciclos de marea) y cuál es la variación temporal de la calidad de la descarga de los ríos que llegan a la laguna. En los dos humedales, entender cómo responden las comunidades de fitoplancton y peces a esa dinámica hidrológica.

La dinámica hidrológica en sistemas como los humedales, es determinante de su estructura, composición y funcionamiento. Se caracterizan por tener un suelo hidromórfico, una lámina de agua superficial de poca profundidad y la vegetación predominante son las hidrófitas. El régimen hidrológico de los humedales está fuertemente influenciado por la estacionalidad de la precipitación y la evaporación que afectan en cantidad de agua y duración del periodo de inundación. Esto a su vez influye en los procesos biogeoquímicos de estos sistemas.

En el humedal se ha estudiado desde hace 8 años su dinámica hidrológica y los parámetros físicoquímicos del agua, conjuntamente con análisis de vegetación e invasión de especies (Peralta, 2007; López-Rosas, 2007; López-Rosas *et al.*, 2005). Mientras que en la laguna, que tiene una boca efímera que abre y cierra anualmente durante los nortes (Rivera-Guzmán, 2008; Lara-Domínguez, datos no publicados), se ha estudiado el ciclo anual de la variación de la comunidad fitoplanctónica y su relación con variables físicoquímicas (1979-1980, 2000-2001, 2002-2003, 2006-2007, 2007-2008; Villalobos *et al.*, 1984; Contreras y Warner, 2004; Legaria, 2003; Rive-

ra-Guzmán, 2008; Lara-Domínguez *et al.*, 2009); así como la variación de algunos parámetros físico-químicos y la distribución de pastos (Rivera-Guzmán, 2008). Asimismo, se examinó la hidrodinámica de la boca de conexión en ciclos de 24 h y el comportamiento hidrológico de la laguna con boca abierta y boca cerrada (Lara-Domínguez *et al.*, 2006).

Papel de la biodiversidad en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. La biodiversidad en términos amplios corresponde no sólo a las especies que habitan en un sitio dado, sino también incluye su papel en el funcionamiento y en la estructuración del mismo ecosistema. En sitios donde confluyen diferentes ecosistemas y actividades humanas, conocer la diversidad y su papel en los ecosistemas es primordial para su conservación (Schwartz *et al.*, 2000). Igualmente, la forma en que se recupera la biodiversidad por medio de sucesión o restauración es desconocida en el caso de muchos ecosistemas, como dunas, selvas secas costeras y humedales en México.

La estación La Mancha contiene diferentes tipos de vegetación en un área relativamente pequeña y en el manglar que rodea la laguna (ca. 80 ha de la estación y 313 ha de manglar) (Castillo-Campos & Medina, 2002). A la fecha se han realizado inventarios de especies en ecosistemas terrestres y acuáticos —vegetación terrestre, algas, anfibios, reptiles, mamíferos, peces, aves (residentes y migratorias), lombrices, cangrejos, hormigas— (Moreno-Casasola, 2006; Castillo-Campos & Medina, 2002; Camacho, 1995; Amador, 2004; Ayala 2008; Rojas-Fernández, datos no publicados; González, datos no publicados). De igual forma se han estudiado diferentes aspectos ecológicos de flora y fauna en los diferentes ecosistemas. Sin embargo, hay una serie de especies de flora y fauna aún no inventariadas tanto en los ecosistemas presentes en La Mancha como en sus alrededores (*v. gr.*, lepidópteros, odonatos, escarabajos). Además se quiere conocer cómo cambia la diversidad en sitios bajo sucesión natural (dunas, selva mediana) y regeneración asistida (humedal), cómo cambia la diversidad en la selva mediana a lo largo del tiempo y cómo participan diferentes especies en el funcionamiento y estructura de los ecosistemas presentes en La Mancha.

Actualmente se tienen cuadros permanentes en los diferentes ecosistemas donde se registrarán cambios en la composición de diversidad (selva mediana, sucesión en las dunas, acahual de selva, manglar, y en la restauración asistida en el humedal). Tanto en las dunas como en el acahual, se tienen registros del cambio en diversidad en diferentes periodos de tiempo, y se continuará con el registro del cambio en la diversidad y composición de las especies. En la selva mediana se hará un nuevo inventario, ya que previamente se han realizado registros de estructura y composición (Capistrán, 2006; Castillo-Campos & Medina, datos no publicados). Por otro lado, se continuará el registro de las especies de flora (*v. gr.*, hongos, líquenes) y fauna (principalmente invertebrados, como lepidópteros, odonatos) aún no conocida en La Mancha. Los métodos de muestreo serán los aplicables para cada uno de los grupos de organismos. Por ejemplo, trampas (subterráneas, epigeas); colecta directa (en la vegetación y muestreo de hojarasca); nucleadores (meso y macrofauna de invertebrados del suelo).

Efecto del cambio climático en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Aunque el clima de la Tierra ha cambiado en el transcurso del tiempo, los cambios climáticos actuales y del futuro están afectados por las actividades humanas que alteran los flujos de materia y energía del planeta (IPCC, 2001a, b). Se predicen incrementos en la temperatura y el nivel del mar, así como mayor frecuencia de huracanes intensos (Watson *et al.*, 2001; IPCC, 2001c; Webster *et al.*, 2005). Entonces, dependiendo de las características geomorfológicas, unas costas perderán sus playas por una mayor erosión, mientras que otras recibirán un mayor aporte de sedimentos (Masters, 2006; Wright *et al.*, 2005). El cambio climático también alterará de manera importante los humedales en su distribución y tamaño al producirse cambios en el hidropereodo, niveles de salinidad y la distribución de los ríos y lagos (Carpenter *et al.*, 1992; Field *et al.*, 2000). Todo esto afectará negativa o positivamente a grupos de especies que comparten ciertos rasgos de historia de vida o comportamientos fisiológicos, alterando las propiedades básicas y el funcionamiento de los ecosistemas (Dukes & Mooney, 1999).

A pesar del efecto potencialmente alto del cambio climático en los sistemas costeros, en México no existen estudios a largo plazo donde se realice este tipo de monitoreo. Interesa conocer cómo han variado algunos parámetros ambientales en el tiempo, así como la línea de costa, la geomorfología y dinámica sedimentaria de los sistemas costeros de La Mancha. Cómo ha variado la cobertura vegetal como consecuencia de estabilización o desestabilización de las dunas. Cómo varía espacial y temporalmente la dinámica hidrológica y de salinidad en el humedal (hidroperiodo). Cómo responden los diferentes componentes del ecosistema (estructura y composición de la vegetación y la diversidad de anfibios, reptiles y peces) a la variación espacio-temporal de la dinámica hidrológica.

Las variaciones en precipitación, temperatura y evapo-transpiración se registran diariamente desde 1980 en la estación meteorológica de La Mancha. Los cambios en la línea de costa así como en la geomorfología, dinámica sedimentaria y cobertura vegetal se han registrado en fotografías aéreas (de 1964 a 2006). Se cuenta con un primer análisis de los cambios de la línea de costa de La Mancha en los últimos 30 años (Psuty *et al.*, en revisión), y se está elaborando un manuscrito sobre los cambios en la zona de dunas costeras a lo largo de tres años también (Psuty *et al.*, en proceso). Por otro lado, se tienen datos sobre el proceso de estabilización de las dunas y la secuencia de sucesión de la vegetación que se registró en cuadros permanentes por 10 años (1988-1998; la lista de especies vegetales, valores de cobertura y frecuencia, movimiento de arena). En los humedales se tienen cuadros permanentes de vegetación y cada seis meses se mide la cobertura de cada especie y cobertura total. El régimen hídrico de los humedales (nivel del agua) se mide en piezómetros cada tres meses y se registrarán algunas características fisicoquímicas (pH, temperatura, salinidad, conductividad).

5.12. Miembros con categoría de individuos

Dentro de la Red MEX-LTER, además de los grupos de investigación cuyo trabajo ha sido descrito en las secciones anteriores, se integran miembros

individuales que no forman parte de un grupo como tal, pero que desarrollan investigación a largo plazo en alguna de las áreas temáticas o que están en proceso de constituir grupos. Mediante la categoría de individuos, en la Red MEX-LTER se busca una inclusión más amplia de investigadores cuyo trabajo corresponda a sus objetivos y misión. Actualmente, se cuenta con diez miembros de la red con esta categoría, cada uno ubicado en un sitio distinto del país, integrando una amplia gama de ecosistemas, proyectos de investigación y variables que están siendo monitoreadas. A continuación se describe brevemente el trabajo de algunos de estos investigadores, por área temática y los lugares donde realizan su trabajo.

5.12.1 Biodiversidad

Jesús Ernesto Arias González. Laboratorio de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida, Yucatán. Departamento de Recursos del Mar.

Línea de monitoreo: diversidad biológica y abundancia de poblaciones clave.

El doctor Arias y sus colaboradores realizan diferentes estudios en sistemas arrecifales del Caribe mexicano. Sus sitios de trabajo se ubican en la Península de Yucatán, en la costa de Quintana Roo e incluyen el Banco Chinchorro y la zona de Mahahual, entre otros; también llevan a cabo proyectos sobre diversidad genética en el Banco de Campeche y sitios adicionales donde laboran. Se encuentran en el Sistema Arrecifal Veracruzano. Entre las variables que han estado monitoreando se incluyen aspectos sobre la cobertura de algunos componentes de la comunidad coralina arrecifal, asociaciones de peces arrecifales con énfasis en pesquería, así como conectividad entre poblaciones de peces y corales. Se está realizando un estudio de la diversidad genética y su relación con el funcionamiento de los ecosistemas de los arrecifes coralinos.

Pedro Antonio Macario Mendoza. Colegio de la Frontera Sur-Unidad Chetumal.

Línea de monitoreo: diversidad biológica y abundancia de poblaciones clave.

Su área de estudio se encuentra en el Jardín Botánico del Centro Integral de Conservación e

Investigación de la Vida Silvestre, que se localiza en San Felipe, Bacalar, estado de Quintana Roo. El clima para esta zona es cálido subhúmedo, con precipitación y temperatura media anual de 1300 mm y 26°C, respectivamente. La vegetación corresponde a una selva mediana subperennifolia con *Cryosophila argentea* como especie dominante. El doctor Macario lleva a cabo el registro de la dinámica de la vegetación secundaria en dos parcelas de 2,000 m² que se originaron tras el abandono de una milpa en el año de 1972. Periódicamente se realizan mediciones de cuatro parámetros diferentes relacionados con la dinámica de la vegetación.

Rodrigo A. Medellín Lagorreta. Instituto de Ecología, UNAM.

Línea de monitoreo: diversidad biológica y abundancia de poblaciones clave.

El doctor Medellín, integrante del Comité de Creación de la Red MEX-LTER, realiza investigación sobre ecología, manejo y conservación de la fauna silvestre en México. Su principal sitio de estudio es la región de la Selva Lacandona, en el estado de Chiapas, donde se encuentra la Reserva de la Biosfera de Montes Azules. Sus líneas de investigación incluyen los efectos de perturbaciones antropogénicas en la Selva Lacandona y sus implicaciones para la conservación y el desarrollo sustentable, la ecología de comunidades y poblaciones de murciélagos y en general distintos aspectos de la conservación de mamíferos.

5.12.2. Dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas

Jorge Arturo Benítez Torres. Epomex-Centro de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México, Universidad Autónoma de Campeche.

Línea de monitoreo: uso del suelo. También se está trabajando en las áreas temáticas de productividad primaria y patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas.

Colaboradores: Dr. Gerardo García-Gil, Dr. Héctor Sanvicente Sánchez, Dr. Shelley Alexander, M. en C. Guillermo J. Villalobos.

El doctor Benítez y colaboradores realizan su investigación en la cuenca hidrográfica del río Candelaria, en el estado de Campeche. Los ecosistemas dominantes en esta zona son: selva baja

subcaducifolia; cuerpos de agua dulceacuícolas y estuarinos.

Áreas temáticas cubiertas:

Patrones y control de la dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas. Incluye monitoreo de nutrientes en la depositación atmosférica húmeda, en ríos y en aguas estuarinas.

Productividad primaria. Ciclos de 24 hrs en estuarios cada 3 meses y mediciones puntuales mensuales en ríos.

Patrones y frecuencia de las perturbaciones en los ecosistemas. Incluye la modelación hidrológica del río, la reconstrucción histórica del uso del suelo de los últimos 40 años y la integración de modelos en ambiente SIG.

5.12.3. Efectos del cambio climático

Gabriela Domínguez Vázquez. Universidad Intercultural de Chiapas.

Línea de monitoreo: clima.

A partir del uso de técnicas palinológicas, los estudios de la doctora Domínguez se enfocan al entendimiento de la influencia del Holoceno tardío en relación a la composición y distribución de la vegetación actual. Su área de estudio es el lago Naja, el cual se localiza en el noreste de la selva lacandona a una elevación de 800 msnm (16°59'27.6"N y 91°35'29.6"O). La temperatura promedio anual está sobre los 22°C y la precipitación alcanza los 2,500 mm al año. Los tipos de vegetación son una mezcla de selva baja de montaña en los valles y bosques de pino-encino en las montañas que se encuentran alrededor del lago. También se encuentran áreas de vegetación secundaria y campos de agricultura de roza tumba y quema.

Roger Orellana Lanza. Unidad de Recursos Naturales, Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Colaboradores: Celene Espadas, Silvia Iriarte, Lilia Carrillo, José Antonio González-Iturbe, Jorge Argáez.

Desde 2002 el doctor Orellana y sus colaboradores estudian los efectos del cambio climático en las especies de palmas nativas de la Península de Yucatán. Para esto realizan el monitoreo de ganancia de carbono cada tres meses a individuos de las 20 especies de palmas estu-

diadas. Su área de trabajo incluye los siguientes tipos de vegetación de la península: matorral de dunas costeras, selva baja caducifolia, selva baja con cactáceas candelabrifformes, selva mediana subcaducifolia, selva mediana subperennifolia, selva baja inundable, selva alta perennifolia, selvas secundarias, sabana. De igual forma, el doctor Orellana y sus colaboradores han realizado estudios sobre variabilidad y cambio climático a partir de bases de datos climáticos de precipitación y temperatura de la red total de estaciones de la Península de Yucatán con series variables desde 1921 a 2005.

5.12.4. Manejo de ecosistemas

Salvador Montiel Ortega. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Unidad Mérida, Yucatán.

Línea de monitoreo: diversidad biológica y abundancia de poblaciones clave.

Desde una perspectiva ecológica y social, el doctor Montiel desarrolla investigación sobre: 1. Grupos de animales clave (*i.e.* quirópteros) en humedales y selvas subtropicales, y 2. Sobre el uso y estado de conservación de especies animales silvestres en zonas rurales. La meta de estos esfuerzos de investigación es desarrollar propuestas de conservación *in situ* orientadas al mantenimiento de la biodiversidad de ecosistemas particulares de Yucatán (por ejemplo humedales costeros y sus áreas de influencia). Las investigaciones del doctor Montiel se realizan principalmente en la zona de influencia de la Reserva de la Biosfera Los Petenes, Campeche (20° 51' -19°49'N, 90°45' -90°20'O - a 2-3 h de manejo en automóvil desde la ciudad de Mérida).

El clima regional es cálido (temperatura promedio anual de 26°C) y seco (precipitación promedio anual de 819 mm). Esta reserva se caracteriza por la presencia de islas de selva o “petenes”, los cuales constituyen islas naturales de vegetación arbórea (con árboles típicamente de 15-20 m de altura) que están rodeadas de pastizales y de otra vegetación nativa. Los *petenes* están sujetos a inundaciones periódicas como resultado de la lluvia estacional, típica de esta región.

Luciana Porter-Bolland. Instituto de Ecología, AC.

Línea de monitoreo: uso del suelo.

La doctora Porter-Bolland enfoca su trabajo a entender la relación entre los cambios en la cobertura vegetal y del uso del suelo visibles a nivel paisaje (mediante el empleo de herramientas como la percepción remota y los SIG), y datos socioeconómicos tomados a nivel familiar. A través de un proceso participativo se involucra a la población local para que adopten los mapas de uso del suelo y de cambios en el paisaje a través del tiempo, como herramientas de planeación y análisis. El área de estudio se denomina La Montaña, ubicada en el municipio de Hopelchén, estado de Campeche. Esta zona se encuentra al norte de la Reserva de la Biosfera de Calakmul y es área focal del Corredor Biológico Mesoamericano. El área es de aproximadamente 200,000 ha y cuenta con una población de menos de 5,000 habitantes pertenecientes a ocho ejidos, en su mayoría de origen maya-yucateco. La zona es un bosque tropical subhúmedo, la vegetación predominante es la selva mediana subperennifolia y cuenta con extensas áreas de selva baja inundable. La precipitación promedio anual es de 1,200 mm con un largo periodo de secas.

Cuadro 3
Grupos de la Red MEX-LTER, tipo de ecosistemas
en los que trabajan y áreas temáticas cubiertas

Grupo	Ecosistemas	Áreas temáticas*							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Alchichica	Laguna	■	■	■	■	■			
Arrecifes del Pacífico	Arrecifes coralinos y rocosos			■	■	■		■	
Chamela	Selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, zona costera	■	■	■	■	■	■	■	■
Ecosistemas del Altiplano	Pastizal halófito, matorral xerófilo		■	■	■		■		
Ecosistemas Costeros de Jalisco y Colima	Zona costera, lagunas costeras y estuarios, plataforma continental	■	■	■	■				
Ecopey	Zona costera, lagunas costeras, manglares y humedales	■	■	■	■			■	■
Gracilis	Pastizales naturales y manejados	■	■	■				■	■
Los Tuxtlas	Selva alta perennifolia	■		■	■	■			
Mapimí	Matorral xerófilo	■	■	■		■			
Sierra de Manantlán	Bosques montanos subtropicales (selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia, bosques de encino, pino, oyamel y mesófilo de montaña), ríos y agroecosistemas.		■	■	■			■	■
La Mancha	Zona costera, manglares, humedales, arrecifes, dunas, selva baja caducifolia, selva mediana subcaducifolia.	■	■	■		■			

* Las áreas temáticas son: 1. Productividad primaria, 2. Dinámica del agua, carbono y nutrientes, 3. Biodiversidad, 4. Perturbaciones, 5. Cambio climático, 6. Interfase de ecosistemas naturales y transformados, 7. Manejo de ecosistemas, 8. Socioecología.

6

Consideraciones finales

La elaboración de este libro partió de la propuesta inicialmente redactada por el Comité de Creación de la Red MEX-LTER, la cual se fue ampliando posteriormente con la colaboración de los miembros de la organización. A través de las páginas de este documento se han presentado las ideas y conceptos que fundamentan el enfoque de investigación ecológica a largo plazo como una forma de abordar el estudio de los procesos que ocurren en la naturaleza y las interacciones de las sociedades humanas con su entorno. Estos procesos tienen lugar en diferentes niveles de organización y escalas espaciales y temporales; sobre todo en el nivel que corresponde a los ecosistemas y el paisaje, el entendimiento de cuestiones tales como los flujos de energía, la dinámica del agua, el carbono y los nutrientes, el papel de la biodiversidad, los regímenes de perturbación, los efectos del cambio climático o las interacciones entre sistemas naturales, transformados o manejados, requiere de estudios a escalas espaciales y temporales amplias. La investigación ecológica a largo plazo se complementa con otros enfoques para contribuir a la construcción y el avance de un campo del conocimiento que tiene un papel fundamental en el entendimiento de los patrones y procesos de la naturaleza, así como en la interacción de los seres humanos con su entorno y en la búsqueda de alternativas para contener y revertir la degradación ambiental, conservar los

ecosistemas y mantener su capacidad de generar servicios de los que depende la vida y el bienestar humano, y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales.

Frente al cambio ambiental global, se espera que la ecología aporte información, modelos, principios, criterios e indicadores útiles para entender el funcionamiento de los ecosistemas y las implicaciones de los impactos e intervenciones humanas en la naturaleza, con el propósito de mantener a largo plazo los “sistemas de soporte de vida” de los cuales depende el sustento de la sociedad. Siendo México uno de los países con mayor diversidad de especies y ecosistemas en el mundo, que además todavía mantiene una notable diversidad cultural, pero que al mismo tiempo enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, la aplicación de la ecología resulta particularmente relevante. La creación de la Red MEX-LTER contribuye a enfrentar este desafío. Esta red ha sido el resultado de un amplio esfuerzo de investigadores de varias instituciones del país y colaboradores del extranjero, para avanzar en el desarrollo de la ciencia de la ecología y su aplicación en México. Los antecedentes que hemos presentado aquí sobre el origen de la red y su relevancia para México, el proceso de su formación, el marco conceptual de sus líneas de investigación y monitoreo y la descripción del trabajo de los grupos e individuos que conforman la MEX-LTER, muestran la complejidad y los

alcances de la tarea que se ha emprendido con esta iniciativa.

La agenda de trabajo de la Red MEX-LTER emana de la internacional y comparte con otras redes nacionales el enfoque de trabajo y muchos de los temas de investigación, pero al mismo tiempo incorpora sus propios planteamientos en el marco de las condiciones particulares de México. Esta red tiene viejos antecedentes, pero es relativamente joven y está en un proceso de desarrollo y construcción; lo que se ha expuesto a lo largo de este libro no es, por tal razón, un planteamiento acabado y mucho menos definitivo. Con este escrito se busca documentar las ideas y experiencias que dieron origen a la MEX-LTER y, sobre todo, proponer y fomentar un proceso de discusión y análisis que permita ir fortaleciendo y ampliando el enfoque de la investigación ecológica a largo plazo en México.

Actualmente los grupos e individuos que integran la Red MEX-LTER están llevando a cabo investigación en las áreas temáticas de productividad primaria, dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas, el papel de la biodiversidad y la influencia de regímenes de perturbación en los procesos ecológicos, las consecuencias del cambio climático y las interacciones e interfases de ecosistemas naturales y transformados; estos temas se complementan con las líneas de monitoreo sobre clima, hidrología, substrato y suelos, flujos de energía y materiales, biodiversidad y poblaciones, productividad primaria y dinámica del paisaje y el uso del suelo, así como los mecanismos para la gestión de la información en los sitios de estudio y en el trabajo en red a través de las reuniones nacionales, talleres y proyectos de colaboración entre los miembros de la organización. Otros temas fundamentales, como la investigación sobre la relación entre las sociedades humanas y la naturaleza, están en proceso de discusión, con la perspectiva de un enfoque socioecológico, enfatizando en la importancia del componente humano. La definición de criterios para el manejo de ecosistemas es un área temática que desempeña un importante papel en la integración y síntesis del trabajo sobre los otros temas, con el fin de generar propuestas y planteamientos que incidan en las políticas, estrategias y prácticas de

la gestión ambiental y el manejo de los recursos naturales. En distintas formas y con diferente grado de desarrollo, los grupos e individuos de la Red MEX-LTER están involucrados en procesos como la conservación y gestión de áreas protegidas o la colaboración con dependencias gubernamentales, organizaciones sociales y comunidades en la atención a problemas ambientales o de manejo de recursos naturales, incidiendo en los sitios y regiones donde llevan a cabo su trabajo. La vinculación entre la investigación y el manejo constituye aún un importante reto para la Red MEX-LTER, pero existe ya una base que ofrece grandes oportunidades.

Uno de los aspectos clave de la Red MEX-LTER es su papel en la formación y capacitación de científicos y profesionales en el campo de la ecología, la gestión ambiental y el manejo de recursos naturales. Un activo de la red que debe fortalecerse es la participación de estudiantes de licenciatura y postgrado, cuya participación en la investigación contribuye no sólo a la generación de conocimiento, sino que además representa el futuro de la tarea científica en los campos señalados. Pensando en el largo plazo, la formación y capacitación es una inversión para mantener la continuidad y sustentabilidad del trabajo de la red; haciendo la analogía con el proceso ecológico, nuestro enfoque de trabajo implica un proceso de “regeneración y sucesión” en el que se van incorporando nuevos investigadores, como lo demuestra la historia de los grupos.

La Red MEX-LTER enfrenta una serie de retos importantes y estos no sólo se derivan de la complejidad de sus temas de investigación, sino también de las condiciones existentes en un país como México, que dificultan la tarea científica. La posibilidad de llevar a cabo investigación ecológica a largo plazo requiere de condiciones institucionales y financieras acordes con esta tarea. Las primeras se refieren a la organización en red que permite la colaboración entre investigadores y centros de investigación, así como la existencia de una base institucional que respalda la tarea de los grupos de trabajo. Las segundas tienen que ver con la posibilidad de financiar el desarrollo de la infraestructura y el equipamiento necesarios para la investigación y mantener las actividades de investigación y monitoreo por

periodos largos de tiempo. Las redes de investigación ecológica a largo plazo que han sido exitosas cuentan con programas de financiamiento también a largo plazo, respaldados por el Estado.

La existencia y el desarrollo de estaciones de campo dedicadas a la investigación son fundamentales para los estudios ecológicos. La mayor parte de los grupos que integran la Red MEX-LTER han podido llevar a cabo su trabajo gracias a las facilidades de infraestructura y equipamiento existentes en estaciones biológicas o campos experimentales como Chamela, Los Tuxtlas, el Laboratorio del Desierto en Mapimí, Las Joyas, La Mancha o Vaquerías, entre otros. El respaldo institucional y la colaboración entre investigadores de distintas universidades y centros de investigación, ha permitido en el caso de grupos como Alchichica, Arrecifes del Pacífico, Ecosistemas del Altiplano, Ecosistemas Costeros, Ecopey o Gracilis abordar la investigación a largo plazo en regiones extensas.

Concentrar los esfuerzos de investigación en localidades geográficas específicas permite ir construyendo una base de conocimiento más sólido y profundo, al mismo tiempo que el intercambio de ideas, experiencias, aprendizajes e información a través de la colaboración en red permite dar al trabajo en los sitios una proyección y alcance nacional e internacional. A través de proyectos en red, talleres de discusión y análisis,

y elaboración de estudios y publicaciones en las que colaboran miembros de distintos grupos de la MEX-LTER, nuestra organización ha estado avanzando en el alcance de su misión: fomentar la investigación ecológica a largo plazo a través de mecanismos de colaboración y cooperación que permitan abordar, de manera interdisciplinaria, el estudio de la estructura y funcionamiento de ecosistemas terrestres y acuáticos, naturales o transformados, en escalas espaciales y temporales amplias, con el fin de contribuir al entendimiento del papel de los procesos ecológicos en la provisión de servicios a la biosfera, incluyendo los proporcionados a la sociedad mexicana en particular, y a la humanidad en general, creando un legado de experimentos y observaciones, adecuadamente diseñados y documentados para las generaciones futuras, y promoviendo la formación, capacitación y entrenamiento de nuevos investigadores, dentro de un marco de investigación interdisciplinaria para abordar problemas de estudio de relevancia ecológica, social, cultural y económica en pro del desarrollo del país.

Esperamos que los conceptos y experiencias que aquí hemos presentado generen un proceso de discusión y análisis, así como nuevas propuestas que permita ir construyendo un enfoque de trabajo dirigido al conocimiento, valorización y conservación del rico patrimonio natural de México.

Literatura citada

- Adame, M.F., J. Alcocer & E. Escobar. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Adams, W. M., R. Aveling, D. Brockington, B. Dickson, J. Elliott, J. Hutton, D. Roe, B. Vira & W. Wolmer. 2004. Biodiversity conservation and the eradication of poverty. *Science* 306:1146-1149.
- Agee, J.K. 1993. *Fire Ecology of Pacific Northwest Forests*. Island Press, Washington, DC.
- Agee, J.K. 2002. The fallacy of passive management. *Conservation in Practice* 3:18-25.
- Agee, J.K. 2003. Historical range of variability in eastern cascades forests, Washington, USA. *Landscape Ecology* 18:725-740.
- Agee, J.K. & M.H. Huff. 1985. Structure and process goals for vegetation in wilderness areas. *Proceedings National Wilderness Research Conference*. Fort Collins, Colorado, EUA. Pp. 17-25
- Agee, J.K. & C.N. Skinner. 2005. Basic principles of forest fuel reduction treatments. *Forest Ecology and Management* 211:83-96.
- Aguado-Santacruz, G.A. & E. García-Moya. 1998. Environmental factors and community dynamics at the southernmost part of the North American Graminetum. I. On the contribution of climatic factors to temporal variation in species composition. *Plant Ecology* 135:13-29.
- Aguado-Santacruz, G.A., García-Moya E., Creque J.A., Meyer S. & Flores-Flores J.L. 2002. Environmental factors and community dynamics at the southernmost part of the North American Graminetum. II. Temporal plant assemblages determined by rainfall patterns. *Plant Ecology* 158:49-63.
- Aguilar-Palomino, B., J. Mariscal-Romero, G. González-Sansón & L.E. Rodríguez-Ibarra. 1996. Ictiofauna demersal de fondos blandos de la plataforma continental de Jalisco y Colima, México, en la primavera de 1995. *Ciencias Marinas* 22(4): 469-481.
- Aguilar-Palomino, B., C. Pérez-Reyes, F. Galván-Magaña & L.A. Abitia-Cárdenas. 2001. Ictiofauna de la Bahía de Navidad, Jalisco, México. *Revista Biología Tropical*. 49(1): 173-190.
- Alcocer, J. & E. Escobar-Briones. 2007. On the ecology of *Caecidotea williamsi* Escobar-Briones & Alcocer (Crustacea: Isopoda: Asellidae) from Alchichica saline lake, Central Mexico. *Hydrobiologia* 576: 103-109.
- Alcocer, J. & Filonov, A.E. 2007. A note on the effects of a large rainfall on saline lake Alchichica, Mexico. *Environmental Geology* 53(4): 777-783.
- Alcocer, J. & A. Lugo. 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, Central Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 523-528.
- Alcocer, J., A. Lugo, S. Estrada, M. Ubeda & E. Escobar. 1993. Littoral chironomids of a Mexican plateau athalassohaline lake. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 25: 444-447.
- Alcocer, J., E. Escobar, A. Lugo & L. Peralta. 1998. Littoral benthos of the saline crater-lakes of the basin of Oriental, Mexico. *International Journal of Salt Lake Research* 7(2): 87-108.

- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M.R. Sánchez & G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 27(5): 3166-3169.
- Alcocer, J., O.A. Escolero-Fuentes & L.E. Marín-Stillman. 2004. Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En: B. Jiménez & L.E. Marín (eds.), D. Morán, O. Escolero & J. Alcocer (coords.). *El agua en México vista desde la academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México. Pp. 57-77.
- Alcocer, J., D.P. López Anaya & L.A. Oseguera Pérez. 2007. Dinámica del carbono particulado en un lago tropical profundo. En: B. Hernández de la Torre & G. Gaxiola (Comps.). *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México*. Instituto Nacional de Ecología y CICESE, México DF. Pp. 39-247.
- Alder, D. & T.J. Synnott. 1992. *Permanent sample plot techniques for mixed tropical forest*. Tropical Forestry Paper 25. Oxford Forestry Institute, University of Oxford, Oxford, Reino Unido.
- Ahlén, I. 1981. Field identification and survey methods based on sounds. *Myotis* 18/19:128-136.
- Allan, J.D. 1995. Stream ecology. *Structure and function of running waters*. Chapman and Hall. Londres, Reino Unido.
- Allen, T.F.H. & Hoekstra, T.W. 1992. *Toward a unified ecology*. Columbia University Press, Nueva York NY, EUA.
- Alvarado, E.C., J.E. Morfín-Ríos, E.J. Jardel P., R.E. Vihnanek, D.K. Wright, D.V. Sandberg, J.M. Michel-Fuentes, C.S. Wright, R.D. Ottmar, D.V. Sandberg & A. Nájera-Díaz. 2008. Fotoseries para la cuantificación de combustibles forestales de México: bosques montanos subtropicales de la Sierra Madre del Sur y bosques templados y matorral submontano del norte de la Sierra Madre Oriental. University of Washington, College of Forest Resources-Pacific Wildland Fire Sciences Laboratory USDA Forest Service. Special Publication No. 1. Seattle, Washington.
- Álvarez-Sánchez, J. & R. Becerra-Enríquez. 1996. Leaf decomposition in a Mexican tropical rain forest. *Biotropica* 28 (4b):657-667.
- Álvarez-Sánchez, J. & E. Naranjo (Eds.). 2003. *Ecología del suelo de la selva tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, AC y Universidad Nacional Autónoma de México, México DF.
- Álvarez-Sánchez, J., E. Naranjo-García & S. Guevara. 2003. Los estudios de ecología del suelo en la selva tropical húmeda mexicana. En: Álvarez-Sánchez, J. & E. Naranjo-García (Eds). *Ecología del Suelo en la Selva tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, AC y Universidad Nacional Autónoma de México, México DF. Pp. 6-16.
- Amador, M.J. 2004. Comunidades de hormigas (*Hymenoptera: Formicidae*) y termitas (*Insecta: Isoptera*) de la fracción leñosa de la hojarasca en una selva de Veracruz. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México DF.
- Amante, M. 2005. Percepciones, actitudes y conocimientos ambientales de niños de doce comunidades rurales aledañas a la Reserva de la Biosfera Chamela Cuixmala, Jalisco, México. Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal., México.
- Amante, M. & L. Barraza. 2002. Percepciones ambientales presentes y futuras de niños de sexto año de primaria en doce comunidades aledañas a la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala. En: Memorias del V Congreso Nacional de Áreas Naturales Protegidas de México. Semarnat y Comisión Nacional Forestal. Guadalajara, Jal., México. Pp. 138.
- Anderson, C.B., R. Rozzi, J.J. Armesto & J.R. Gutiérrez. 2010. Construyendo una Red Chilena para Estudios Socioecológicos a Largo Plazo: avances, enfoques y relevancia. *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 1-11.
- Aoki, I. 2006. Ecological pyramid of dissipation function and entropy production in aquatic ecosystems. *Ecological Complexity* 3:104-108.
- Aranda S., J.M. 1981. *Rastros de los mamíferos silvestres de México. Manual de campo*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, Veracruz, México.
- Araujo, M. B., & C. Rahbek. 2006. How does climate change affect biodiversity? *Science* 313:1396-1397.
- Araujo, M. B., & C. Rahbek. 2007. Conserving biodiversity in a world of conflicts. *Journal of Biogeography* 34:199-200.
- Arias-González, J.E. & S. Morand. 2006. Trophic functioning with parasites: a new insight for ecosystem analysis. *Marine Ecology-Progress Series* 320:43-53.
- Arno S.F. & K.M. Sneek 1977. A method for determining fire history in coniferous forests of the Mountain West. *Intermountain Forest and Range Experiment Station*. Department of Agriculture (USDA). Forest Service. *General Technical Report INT-42*. EUA. Pp. 1-27
- Ayala, A.C. 2008. Patrones de aprovechamiento del recurso por las hormigas generalistas de dos sel-

- vas de La Mancha, Ver. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México DF.
- Bailey, R.G. 1996. *Ecosystem Geography*. Springer Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Balcázar M., O.E. 2011. Patrones geoecológicos de incendios forestales en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán. Tesis. Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Universidad de Guadalajara-CUCSur. Autlán, Jalisco, México.
- Balvanera, P., E. Lott, G. Segura, Ch. Siebe & A. Islas. 2002. Patterns of β -diversity in a Mexican tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 13: 145-158.
- Barajas-Guzmán, G. & J. Álvarez-Sánchez. 2003. The relationships between litter fauna and rates of litter decomposition in a tropical rain forest. *Applied Soil Ecology* 24:91-100.
- Barradas, V. 1991. Radiation regime in a tropical dry deciduous forest in Western Mexico. *Theoretical Applied Climatology* 44: 57-64.
- Barradas, V. & L. Fanjul. 1985. Equilibrio hídrico y evapotranspiración en una selva baja caducifolia de la costa de Jalisco, México. *Biótica* 10: 199-218.
- Barral, H. 1988. El hombre y su impacto en los ecosistemas a través del ganado. En Montaña C. (ed.). *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo, y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. México DF. Pp. 241-268
- Bartolino, J.R., 1988. Cenozoic geology of the eastern half of La Flor quadrangle, Durango and Chihuahua, Mexico. En: Montaña C. (Ed.). *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo, y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. México, DF. Pp. 79-97.
- Bastida-Zavala, R. 2006. Reseña bibliográfica: Atlas de corales pétreos (*Anthozoa: Scleractinia*) del Pacífico mexicano. *Ciencia y Mar* 29: 58-64.
- Batisse, M. 1986. Developing and focusing the biosphere reserve concept. *Nature and Resources* 22(3): 1-10
- Bazzaz, F., G. Ceballos, M. Davis, R. Dirzo, P. R. Ehrlich, T. Eisner, S. Levin, J. H. Lawton, J. Lubchenco, P. A. Matson, H. A. Mooney, P. H. Raven, J. E. Roughgarden, J. Sarukhán, G. D. Tilman, P. Vitousek, D. H. Wall, E. O. Wilson, & G. M. Woodwell. 1998. Ecological science and the human predicament. *Science* 282: 879-879.
- Berkes, F. & C. Folke. 1998. Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. En: F. Berkes & C. Folke (Eds.). *Linking social and ecological systems. Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. Pp. 1-25
- Berkes, F. J. Colding & C. Folke (Eds). 2003. *Navigating social-ecological systems. Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Bezaury-Creel, J. E. 2005. Protected areas and coastal and ocean management in Mexico. *Ocean & Coastal Management* 48: 1016-1046.
- Bierregard Jr., R.O. & P.C. Stouffer. 1997. Understory birds and dynamic habitat mosaics in Amazonian rainforests. En: W.F. Laurance and R.O. Bierregaard, Jr. (Eds.) *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management and Conservation of Fragmented Communities*. Chicago: University of Chicago Press. Pp: 138-155.
- Bisby, F.A., J. Coddington, J.P Thorpe, J. Smartt, R. Hengeveld, P.J. Edwards, & S.J. Duffield. 1995. Characterization of Biodiversity. En: V.H. Heywood, (Ed.). *Global Biodiversity Assessment*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. Pp. 21-106
- Bishop, J. & N. Landell-Mills. 2003. Los servicios ambientales de los bosques: información general. En: S. Pagiola, J. Bishop & N. Landell-Mills (Eds.) *La venta de servicios ambientales forestales*. Instituto Nacional de Ecología. México, DF, México. Pp. 43-76.
- Bitrán B., D. 2001. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99*. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México DF, México.
- Blasius, B., A. Huppert & L. Stone. 1999. Complex dynamics and phase synchronization in spatially extended ecological systems. *Nature* 399: 354-359.
- Boege, E. 2009. El reto de la conservación de la biodiversidad en los territorios de los pueblos indígenas. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF, México. Pp. 603-649.
- Boesch, D. F. 2006. Scientific requirements for ecosystem-based management in the restoration of Chesapeake Bay and Coastal Louisiana. *Ecological Engineering* 26: 6-26.
- Bookhout, T.A. (Ed.). 1996. *Research and management techniques for wildlife and habitats*. The Wildlife Society. Bethesda, Maryland, EUA.
- Bormann, F.H. & G.E. Likens. 1979. *Pattern and process in a forested ecosystem*. Springer Verlag. Nueva York, NY, EUA.

- Botkin, D.B. 1990. *Discordant Harmonies*. Oxford University Press. Nueva York NY, EUA.
- Botkin, D.B. 1993. *Forest dynamics. An ecological model*. Oxford University Press. Oxford, Reino Unido.
- Boyden, S., Millar, S., Newcombe, K. & O'Neill, B. 1981. *The Ecology of a City and Its People: the Case of Hong Kong*. Australian National University Press, Canberra, Australia.
- Boulding, K. E. 1966. The economics of the coming spaceship Earth. En: H.E. Daly (Ed.). *Environmental quality issues in a growing economy*. Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland, EUA.
- Boyer, E. W., R. W. Howarth, J. N. Galloway, F. J. Dentener, P. A. Green & C. J. Vorosmarty. 2006. Riverine nitrogen export from the continents to the coasts. *Global Biogeochemical Cycles* 20, GB1S91, DOI:10.1029/2005GB002537.
- Bradshaw, G.A. & P.A. Marquet (Eds.). 2003. *How Landscapes Change. Human Disturbance and Ecosystem Fragmentation in the Americas*. Springer Verlag, Nueva York, EUA. Ecological Studies, Vol. 162.
- Bratton, S.P., P.S. White & M.E. Harmon. 1980. Disturbance and recovery of plant communities in Great Smoky Mountains National Park: Successional dynamics and concepts of naturalness. En: M.A. Hemstrom & J.F. Franklin (Eds.) *Successional research and environmental pollutant monitoring associated with Biosphere Reserves*. Proceedings 2nd US-USSR Symposium on Biosphere Reserves. US-MAB, Washington DC, EUA. Pp. 42-79.
- Brawn, J.D., S.K. Robinson & F.R. Thompson III. 2001. The role of disturbance in the ecology and conservation of birds. *Annual Review of Ecology and Systematics* 32:251-276.
- Bray, J.R. & E. Gorham. 1964. Litter production in forests of the world. *Advances in Ecological Research* 2: 101-157.
- Breimer, R.F. 1988. Physiographic soil survey. *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo, y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. México DF. Pp. 115-134.
- Brown, B.E. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16: 129-138.
- Brown, J.K. 1974. Handbook of inventorying woody material. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experimental Station. Gen. Tech. Rep. INT-16. Ogden Utah, EUA.
- Brown, S. & A. E. Lugo. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187.
- Brown, S. & A.E. Lugo. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology* 6: 1-32.
- Budowski, G. 1959. Algunas relaciones entre la presente vegetación y antiguas actividades del hombre en el trópico americano. *Actas del 33o Congreso Internacional de Americanistas*. San José, Costa Rica. Tomo 1. Pp. 259-263.
- Burgos, A. 1999. Dinámica hidrológica del bosque tropical seco en Chamela, Jalisco, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México DF.
- Burgos, A. & J. M. Maass. 2004. Vegetation change associated with land-use in tropical dry forest areas of Western Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 475-481.
- Burgos, A., M. Maass, G. Ceballos, M. Equihua, E.J. Jardel, R.A. Medellín, L. Hernández, R. Ayala & A. Equihua. 2007. La investigación ecológica de largo plazo y su proyección en México. *Ciencia y Desarrollo* 33 (204): 24-31.
- Caballero, M., G. Vilaclara, A. Rodríguez & D. Juárez. 2003. Short-term climatic change in lake sediments from Lake Alchichica, Oriental, Mexico. *Geofísica Internacional* 42(3): 529-537.
- Cadenasso, M. L., M. M. Traynor, & S. T. A. Pickett. 1997. Functional location of forest edges: gradients of multiple physical factors. *Canadian Journal of Forest Research* 27: 774-782.
- Cadenasso, M. L., S. T. A. Pickett, K. C. Weathers, S. S. Bell, T. L. Benning, M. M. Carreiro, & T. E. Dawson. 2003. An interdisciplinary and synthetic approach to ecological boundaries. *Bioscience* 53:717-722.
- Cahoon, D. R. 2006. A review of major storm impacts on coastal wetland elevations. *Estuaries and Coasts* 29:889-898.
- Cairns, J. 1988. Increasing biodiversity by restoring damaged ecosystems. En: E.O. Wilson (Ed.) *Biodiversity*. National Academy Press. Washington DC, EUA. Pp. 333-343.
- Calderón Aguilera, L. E., H. Reyes Bonilla & J. D. Carriquiry. 2007. El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. En: G. Gaxiola Castro & B. Hernández de la Torre (Eds.). *Carbono en ecosistemas acuáticos de México*. Ensenada, Baja California, México.
- Calderón Aguilera, L.E., M. Martínez & L. Porter. 2008. Perturbaciones sobre ecosistemas mexicanos. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215: 18-23.

- Calva, J.L. 2000. *México más allá del neoliberalismo: opciones dentro del cambio global*. Plaza y Janés. México DF, México.
- Camacho, R.G. 1995. Estudio de la macrofauna edáfica de tres agroecosistemas en La Mancha, Ver. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad Veracruzana- Campus Córdoba. Córdoba, Veracruz, México.
- Campbell, H.W., & S.P. Christman. 1982. Field techniques for herpetofaunal community analysis. Pp. 193-200. En: N.J. Scott Jr. (Ed.) *Herpetological Communities*. Wildlife Research Report No. 13. US Fish and Wildlife Service, Washington, DC, EUA.
- Camou, A. 2001. Análisis de patrones microclimáticos una selva baja caducifolia de Chamela Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. UNAM, México, DF.
- Campo, J. 1995. Ciclo del fósforo en un ecosistema tropical estacional. Tesis Doctoral. UACPyP, Centro de Ecología, UNAM, México, DF.
- Campo, J., J. M. Maass & L. De Pablos 2001. Intemperismo en un bosque tropical seco de México. *Agrociencia* 35(2): 245-254.
- Campo, J., J. M. Maass, V. Jaramillo & A. Martínez-Yrizar. 2000. Calcium, potassium and magnesium cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Biogeochemistry* 49(1) : 21-36.
- Campo, J., J. M. Maass, V. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar & J. Sarukhán. 2001. Phosphorus cycling in a Mexican tropical dry forest ecosystem. *Biogeochemistry* 53: 161-179.
- Campo, J., V. J. Jaramillo & J. M. Maass. 1998. Pulses of soil phosphorus availability in a Mexican tropical dry forest: effects of seasonality and level of wetting. *Oecologia* 115:167-172.
- Canales-Delgado, J.C., L. Scott, M. Cotera & M. Pando-Moreno. 2008. Observations on flocking behavior of Worthen's Sparrows (*Spizella wortheni*) and occurrence in mixed-species flocks. *The Wilson Journal of Ornithology* 120 (3).
- Cano, M. 2006. El conocimiento, la percepción y la actitud de niños de nivel preescolar sobre el bosque tropical caducifolio, a través de los servicios ambientales que proporciona el ciclo hidrológico y el suelo. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, México, DF.
- Capistrán, B.A. 2006. Remoción de propágulos por el cangrejo rojo *Gecarcinus lateralis* Freminville 1835, y la estructura de la selva mediana subcaducifolia costera de La Mancha, Veracruz, México. Posgrado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales, Instituto de Ecología AC, Xalapa, Veracruz, México.
- Carabias, J., E. Provencio & C. Toledo. 1994. *Manejo de recursos naturales y pobreza rural*. Fondo de Cultura Económica. México DF.
- Cárdenas-Hernández, O. G. & L. M. Martínez-Rivera. 2001. GIS-based approach for participatory decision making in Mexico. *GIS Development* 5 (10):28-31.
- Carpenter, S. R. 1989. Replication and treatment strength in whole-lake experiments. *Ecology* 70: 453-463.
- Carpenter, S.R. 1998. The need for large-scale experiments to assess and predict the response of ecosystems to perturbation. En: Pace, M.L. & P.M. Groffman (Eds.). *Success, limitations, and frontiers in ecosystem science*. Springer Verlag, Nueva York NY, EUA. Pp. 287-312.
- Carpenter, S.R. & C. Folke. 2006. Ecology for transformation. *Trends in Ecology and Evolution* 21(6): 309-315.
- Carpenter, S.R. & M.G. Turner. 2001. Hares and tortoises: Interactions of fast and slow variables in ecosystems. *Ecosystems* 3: 495-497.
- Carpenter, S.R., S.G. Fisher, N.B. Grimm & J.F. Kitchell. 1992. Global change and freshwater ecosystems. *Annual Review Ecology and Systematics* 23: 119-3.
- Carriquiry, J.D. & H. Reyes Bonilla. 1997. Estructura de la comunidad y distribución geográfica de los arrecifes coralinos de Nayarit, Pacífico de México. *Ciencias Marinas* 23: 227-248.
- Carriquiry, J.D., Cupul-Magaña A.L., Rodríguez-Zaragoza F. & P. Medina-Rosas. 2001. Coral bleaching and mortality in the Mexican Pacific during the 1997-98 El Niño and prediction from a remote sensing approach. *Bulletin Marine Science* 69: 237-249.
- Carthew, S. M. & E Slater. 1991. Monitoring animal activity with automated photography. *Journal of Wildlife Management* 55: 689-692
- Castellanos, J. 1997. Efecto de la roza, tumba y quema sobre la dinámica de las raíces finas de una selva baja caducifolia. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México, DF.
- Castillo, A. 2000. Ecological information system: Analyzing the communication and utilization of scientific information in Mexico. *Environmental Management* 25: 383-392.
- Castillo, A., & V. M. Toledo. 2000. Applying ecology in the Third World: the case of Mexico. *Bioscience* 50: 66-76.

- Castillo, A., M.A. Magaña, A. Pujadas, L. Martínez & C. Godínez. 2005. Understanding rural people interaction with ecosystems: a case study in a tropical dry forest of Mexico. *Ecosystems* 8: 1-13.
- Castillo, A., S. García-Ruvalcaba & L.M. Martínez-Rivera. 2002. Environmental education as facilitator of the use of ecological information: a case study in Mexico. *Environmental Education Research* 8(4): 395-411.
- Castillo-Campos, G. & M.E. Medina A. 2002. *Árboles y arbustos de la Reserva Natural La Mancha, Veracruz*. Instituto de Ecología, AC. Xalapa, Veracruz, México.
- Cazenave, A., & R. S. Nerem. 2004. Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- Ceballos, G. & A. García. 1995. Conserving Neotropical biodiversity: the role of dry forest in Western Mexico. *Conservation Biology* 9: 1349-1356.
- Cervantes, L. 1988. Intercepción de lluvia por el dosel en una comunidad tropical. *Ingeniería Hidráulica en México* (Segunda época) 2: 38-43.
- Cervantes, L., J. M. Maass & R. Domínguez. 1988. Relación lluvia-escurrimiento en un sistema pequeño de cuencas de selva baja caducifolia. *Ingeniería Hidráulica en México* (Segunda época) 1: 30-42.
- Challenger, A. 1998. *Utilización y Conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. Conabio, UNAM y Agrupación Sierra Madre, sc. México DF, México.
- Challenger, A. & R. Dirzo. 2009. Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF, México. Pp. 37-73.
- Challenger, A. & J. Soberón. 2008. Los ecosistemas terrestres. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, Vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF, México. Pp. 87-108.
- Chambers, D. P., J. L. Chen, R. S. Nerem, & B. D. Tapley. 2000. Interannual mean sea level change and the Earth's water mass budget. *Geophysical Research Letters* 27: 3073-3076.
- Chapin III, F.S., B.H. Walker, R.J. Hobbs, D.U. Hooper, J.H. Lawton, O.E. Sala & D. Tilman. 1997. Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science* 277: 500-504.
- Chapin III, F.S., P.A. Matson & H.A. Mooney. 2002. *Principles of terrestrial ecosystems ecology*. Springer. Nueva York NY, EUA.
- Chapin, F. S., III, E. S. Zaveleta, V. T. Eviner, R.L. Naylor, P.M. Vitousek, S. Lavorel, H. L. Reynolds, D. U. Hooper, O. E. Sala, S. E. Hobbie, M. C. Mack, & S. Diaz. 2000. Consequences of changing biotic diversity. *Nature* 405: 234-242.
- Chapman, S.B. 1976. *Methods in Plant Ecology*. Blackwell, Oxford, Reino Unido.
- Childers, D. L. 2006. A synthesis of long-term research by the Florida Coastal Everglades LTER Program. *Hydrobiologia* 569: 531-544.
- Christensen, N.L. & R.K. Peet. 1981. Secondary forest succession on the North Carolina Piedmont. En: D.C. West, H.H. Shugart & D.B. Botkin (Eds.) *Forest Succession: Concept and Application*. Springer Verlag, Nueva York. Pp. 230-245.
- Christensen, N.L. 1997. Managing for heterogeneity and complexity on dynamic landscapes. En: S.T.A. Pickett, R.S. Ostfeld, M. Shachack & G.E. Likens (Eds.) *The ecological basis of conservation*. Chapman & Hall. Nueva York, EUA. Pp. 167-186.
- Christensen, N.L., A.M. Bartuska, J.H. Brown, S. Carpenter, C. D'Antonio, R. Francis, J.F. Franklin, J.A. MacMahon, R.F. Noss, D.J. Parsons, C.H. Peterson, M.G. Turner & R.G. Woodmansee. 1996. The report of the Ecological Society of America Committee on the scientific basis for ecosystem management. *Ecological Applications* 6 (3): 665 - 691.
- Clark, C.W. 1989. Bioeconomics. En: J. Roughgarden, R.M. May & S.A. Levin (Eds.) *Perspectives in Ecological Theory*. Princeton University Press. Princeton, Nueva Jersey, EUA. Pp. 275-286.
- Clark, D. A., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, J. Ni, & E. A. Holland. 2001. Net primary production in tropical forests: An evaluation and synthesis of existing field data. *Ecological Applications* 11: 371-384.
- Clark, D. B., & D. A. Clark. 2006. Tree growth, mortality, physical condition, and microsite in old-growth lowland tropical rain forest. *Ecology* 87 8: 2132.
- Clark, D.A. 2002. Are tropical forests an important carbon sink?: reanalysis of the long-term plot data. *Ecological Applications* 12:3-7.
- Clark, D.A., S.C. Piper, C.D. Keeling, & D.B. Clark. 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000. *PNAS* 100(10): 5852-5857.

- CNUMAD (Comisión de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo). 1987. *Nuestro futuro común*. Alianza Editorial, Madrid, España.
- Conanp. 2007. Programa de Conservación y Manejo Reserva de la Biosfera Islas Mariás, México. (Elaboradores, Compiladores y Recopiladores: Cupul-Magaña, A.L., Medina-Rosas, P., Frías-Ureña, G., Pérez-Zamora, A., Topete-Ángel, V., Miramontes-Lau, E., Macías-Rodríguez, M.A., García-Guerrero, R., Cruz-García, C., Cruz-García, R., Ramos-Viera, A.). Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México DF.
- Conanp. 2007. Programa de Conservación y Manejo del Parque Nacional Islas Marietas. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. México DF.
- Connell, J.H. 1979. Intermediate-disturbance hypothesis. *Science* 204: 1344-1345.
- Connell, J.H. 1978. Diversity in tropical rain forests and coral reefs. *Science* 199: 1302-1310.
- Contreras, F. & B.G. Warner. 2004. Ecosystem characteristics and management considerations for coastal wetlands in Mexico. *Hydrobiologia* 511: 233-245.
- Contreras-Martínez, S. & E. Santana C. 1995. The effect of forest fires on migratory birds in the Sierra de Manantlán, Jalisco, México. En: M.H. Wilson & S.A. Sader (Eds.). *Conservation of Neotropical Migratory Birds in México*. Maine Agricultural and Forest Experiment Station. Miscellaneous Publication 727. Pp. 113-122.
- Cordero, P. 2005. Percepciones sociales sobre el deterioro ambiental y la restauración ecológica: un estudio de caso en la región de Chamela-Cuixmala, Jalisco. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas UNAM, México, DF.
- Cortéz, C. 1991. *Geografía Histórica*. Instituto Mora-Universidad Autónoma Metropolitana. México DF. México. Pp. 9-22.
- Costanza, R. 1996. Ecological economics: reintegrating the study of humans and nature. *Ecological Applications* 6(4): 978-990.
- Costanza, R., & S. Gottlieb. 1998. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part II. *Ecological Modeling* 112: 81-84.
- Costanza, R., L. Wainger, C. Folke & K.G. Mäler. 1993. Modeling complex ecological economic systems. *BioScience* 43 (8): 545-555.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, S. Naeem, K. Limburg, J. Paruelo, R.V. O'Neill, R. Raskin, P. Sutton & M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Cotler H., E. Durán & C. Siebe. 2002. Caracterización morfo-edafológica y calidad de sitio de un bosque tropical caducifolio. En: Noguera, F., J. H. Vega- Rivera, H. N. García-Aldrete & M. Quesada-Avedaño (Eds). *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México DF. Pp. 17-79.
- Cowx, I.G. (Ed.). 1997a. Stocking and introduction of fish. Fishing News Books, Blackwell Science, Oxford, Reino Unido.
- Cowx, I.G. 1997b. L'introduction d'espèces de poissons dans les eaux douces européennes: succès économiques ou désastre écologique? *Bulletin Francais de la Pêche et de la Pisciculture* 344-345 : 57-77.
- Cramer, W., B. Moore, & D. Sahagian. 1996. Data needs for modeling global biospheric carbon fluxes - some lessons from a comparison of models. *IGBP Newsletter*, September.
- Crowder, L.B., E.L. Janzen, N. Avissar, R. Bjorkland, C. Latanich & M.B. Ogburn. 2008. The impacts of fisheries on marine ecosystems and the transition to ecosystem-based management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 39: 259-278.
- Crutzen, P. J. 2002. Geology of mankind: the Anthropocene. *Nature* 415:23.
- Cuevas, R. & E.J. Jardel (Eds.). 2004. *Flora y vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco México.
- Curtis, J.T. 1956. The modification of mid-latitude grasslands and forests by man. En: W.L. Thomas, Jr. (ed.), *Man's Role in Changing the Face of the Earth*. Chicago: University of Chicago Press.
- Dallmeier, F. & J. A. Comiskey (Eds.). 1998. "Forest biodiversity research, monitoring and modeling." Man and the Biosphere Series, volume 20. UNESCO- Parthenon Publishing Group. Nueva York, EUA.
- Davidson, E. A., P. A. Matson, P. M Vitousek, R. Riley, K. Dunkin, G. García-Méndez & J. M. Maass. 1993. Processes regulating soil emissions of NO and N₂O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology* 74: 130-139.
- Davidson, E. A., P. M. Vitousek, P. A. Matson, R. Riley, G. García-Méndez & J. M. Maass. 1991. Soil emissions of nitric oxide in a seasonally dry tropical forest. *Journal of Geophysical Research* 96, D8: 15439-15445.
- Davis, M.B. 1989. Retrospective studies. En: G.E. Likens (Ed.) *Long-term studies in ecology*:

- Approaches and Alternatives*. Springer Verlag. Nueva York, EUA. Pp. 71-89.
- Day, G.M. 1953. The Indian as an ecological factor in the Northeastern forest. *Ecology* 34: 329-346.
- Day, J. W., D. F. Boesch, E. J. Clairain, G. P. Kemp, S. B. Laska, W. J. Mitsch, K. Orth, H. Mashriqui, D. J. Reed, L. Shabman, C. A. Simenstad, B. J. Streever, R. R. Twilley, C. C. Watson, J. T. Wells, & D. F. Whigham. 2007. Restoration of the Mississippi Delta: Lessons from Hurricanes Katrina and Rita. *Science* 315:1679-1684.
- Day, J. W., J. Barras, E. Clairain, J. Johnston, D. Justice, G. P. Kemp, J. Y. Ko, R. Lane, W. J. Mitsch, G. Steyer, P. Templet, & A. Yañez-Arancibia. 2005. Implications of global climatic change and energy cost and availability for the restoration of the Mississippi delta. *Ecological Engineering* 24:253-265.
- Day, J.W., C.S. Hopkinson & H.C. Loesch. 1977. Modeling man and nature in southern Louisiana. En: C.A.S. Hall & J.W. Day (Eds.) *Ecosystem modeling in theory and practice: an introduction with case histories*. John Wiley & Sons. Nueva York, EUA. Pp. 381-392.
- Daily, G. 1997. *Nature's services*. Island Press, Covello, California, EUA.
- De Ávila, A. 2008. La diversidad lingüística y el conocimiento etnobiológico. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, vol. 1: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México DF, México. Pp. 497-556.
- De Ita-Martínez, C. 1983. Patrones de producción agrícola en un ecosistema tropical estacional en la costa de Jalisco. Tesis de Licenciatura, UNAM, México, DF.
- De Jong, B.H.J., M.A. Cairns, P.K. Haggerty, N. Ramírez-Marcial, S. Ochoa-Gaona, J. Mendoza-Vega, M. González-Espinosa & I. March-Mifsut. 1999. Land-use change and carbon flux between 1970s and 1990s in central highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management* 23(3): 373-385.
- Delcourt, H.R. 1987. The impact of prehistoric agriculture and land occupation on natural vegetation. *Ecology* 34: 341-346.
- De Leo, G. & S. Levin. 1997. The multifaceted aspects of ecosystem integrity. *Conservation Ecology* 1:3. En línea: <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art3/>.
- Delhoume, J.P., 1997. Fonctionnement hydro-pédologique d'une toposequence de sols en milieu aride (Réserve de la biosphère de Mapimí, Nord Mexique). Thèses et documents microfiches. IRD-Editions, París, Francia.
- Denevan, W.M. 1992. The pristine myth: the landscape of the Americas in 1492. *Annals of the Association of American Geographers* 82(3): 369-385.
- Díaz, S.V. 1997. Dinámica de nitrógeno y fósforo en la hojarasca de una selva baja caducifolia en Chamela Jalisco, México. Tesis de Licenciatura, UNAM, México, DF.
- Dirzo, R. & C. García. 1992. Rates of deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical area in Southeast Mexico. *Conservation Biology* 6: 84-90.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely & J. A. Kleypas. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science* 1: 169-192.
- Douglas, J. E. & W.T. Swank. 1975. *Effects of management practice on water quality and quantity: Coweeta Hydraulic Laboratory, North Carolina*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. NE-13. Broomall, PA, EUA.
- Dukes, J.S. & H.A. Mooney. 1999. Does global change increase the success of biological invaders? *Trends in Ecology and Evolution* 14 (4): 135-139.
- Egan, D.E. & E.A. Howell 2001. *The historical ecology handbook*. Island Press. Washington DC, EUA.
- Ehleringer, J.R. & C. Field. 1993. *Scaling physiological processes: leaf to globe*. Academic Press, Nueva York, NY, EUA.
- Ehrlich, A. H. 2002. Ecology and the crisis of overpopulation: Future prospects for global sustainability. *Environment and Development Economics*. 7: 193-196.
- Ehrlich, P.R. & A. Ehrlich. 1981. *Extinctions*. Random House, Nueva York, NY, EUA.
- Ellis, E.C. & N. Ramankutty. 2008. Putting people in the map: anthropogenic biomes of the world. *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(8): 439-447.
- Endter-Wada, J., D. Blahna, R. Krannich & M. Brunson. 1998. A framework for understanding social science contributions to ecosystem management. *Ecological Applications* 8:891-904.
- Equihua M & A, López. 2008. Investigación ecológica a largo plazo, gestión para la información. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215: 44-49.
- Escobar, E. & J. Alcocer. 2002. *Caecidotia williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species from a saline crater-lake in the eastern Mexican Plateau. *Hydrobiologia* 477: 93-105.
- Escobar Briones, E., J. Alcocer, E. Cienfuegos & P. Morales. 1998. Carbon stable isotopes of pelagic

- and littoral communities in Alchichica crater-lake, Mexico. *International Journal of Salt Lake Research* 7(4): 345-355.
- Esteban, J.R. 1986. Contenido mineral de la hojarasca en una selva baja caducifolia en la costa de Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. ENEP Zaragoza, UNAM, México, DF.
- Estrada, C, E., Villarreal Q. J.A., Scott M.L. 2005. Flora de los pastizales en comunidades de perrito llanero (*Cynomys mexicanus*) en el noreste de México. *Anales del Instituto de Biología de la UNAM*.
- Ewe, S. E., D. L. Childers, E. E. Gaiser, D. Iwaniec, V. H. Rivera-Monroy, & R. R. Twilley. 2006 Spatial and temporal patterns of aboveground net primary productivity (ANPP) in the Florida Coastal Everglades LTER (2001-2004). *Hydrobiologia* 569: 459-474.
- Ezcurra, E. 1992. Crecimiento y colapso en la Cuenca de México. *Ciencias* 25:13-27.
- Falcón, L.I., E. Escobar & D. Romero, 2002. Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacteria consortia in Alchichica crater-lake, Mexico. *Hydrobiologia* 467: 71-78.
- Fanjul, L. & V.L. Barradas. 1985. Stomatal behavior of two heliophile understory species of a tropical deciduous forest in Mexico. *Journal Applied Ecology* 22: 943-954.
- Fanjul, L. & V.L. Barradas. 1987. Diurnal and seasonal variation in the water relations of some deciduous and evergreen trees of a deciduous dry forest of the western coast of Mexico. *Journal Applied Ecology* 24: 289-303.
- Farfán, M. 2009. De la percepción remota a la social: deforestación y conservación (1971-2000) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco. Tesis de Maestría en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. México DF.
- Fath, B.D. 2009. Ecosystem ecology. En: Jørgensen, S.V. (Ed.) *Ecosystem Ecology*. Elsevier, Amsterdam, Países Bajos. Pp. 6-12.
- Field, J.C., D.F. Boesch, D. Scavia, R. Buddemeier, V.R. Burkett, D. Cayan, M. Fogarty, M. Harwell, R. Howarth, C. Mason, L.J. Pietrafesa, D. Reed, T. Royer, A. Sallenger, M. Spranger & J.G. Titus. 2000. Potential consequences of climate. Variability and change on coastal areas and marine resources. En: National Assessment Synthesis Team (Eds.) *Climate change impacts on the United States. The potential consequences of climate variability and change: overview*. Foundation Report. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Figueroa-Rangel, B.L., K.J. Willis & M. Olvera-Vargas. 2008. 4200-years of pine-dominated forest dynamics in the uplands of west-central Mexico: a human or natural legacy? *Ecology* 89 (7): 1893-1907.
- Figueroa-Rangel, B.L., K.J. Willis & M. Olvera-Vargas. 2009. Cloud forests dynamics in the Mexican neotropics during the last 1300 years. *Global Change Biology* 16: 1689-1704.
- Filonov, A.E. 1999. Tsunami waves on the shelf near the west coast of México (October 9, 1995). *Izvestia, Atmospheric and Ocean Physics*. 35(3): 370-380.
- Filonov, A.E. 2000. Internal tide and tsunami waves in the continental shelf of the Mexican western coast. *Oceanography of the Eastern Pacific* 1: 31-45.
- Filonov, A.E. & J. Alcocer. 2002. Internal waves in a tropical crater-lake: Alchichica, Central Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 28: 1857-1860.
- Filonov, A.E., & K.A. Konyaev. 2006. Breaking of a tidal internal wave on a steep shelf as inferred from temperature measurements. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics* 42 (4): 523-530.
- Filonov, A.E., C.O. Monzón & I.E. Tereshchenko. 1996. Acerca de las condiciones de generación de ondas internas de marea de la costa occidental de México. *Ciencias Marinas*. 22(3): 255-272.
- Filonov, A.E., I.E. Tereshchenko & C. Monzón. 1998a. Variation of the temperature, salinity and its structure on the continental shelf of the west part of México. *Journal of Russian Meteorology and Hydrology* 6:51-58.
- Filonov, A.E., I.E. Tereshchenko & C. Monzon. 1998b. The structure of space-time temperature variations on the western shelf of México. *The allerton Press. Journal of Russian Meteorology and Hydrology* 6: 38-43.
- Filonov, A., I.E. Tereshchenko, C. Monzón, M. González-Ruelas & E. Godínez-Domínguez. 2000. Variabilidad estacional de los campos de temperatura y salinidad en la zona costera de los estados de Jalisco y Colima. *Ciencias Marinas*. 25(2): 303-321.
- Fischer-Kowalski, M., & W. Hüttler. 1998. Society's Metabolism. The intellectual history of material flow analysis, Part II: 1970-1998. *Journal of Industrial Ecology* 2(4): 107-137.

- Foley, J.A. 1994. Net primary productivity in the terrestrial biosphere - the application of a global model. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 99: 20773-20783.
- Folke, C., Jansson, A., Larsson, J. & Costanza, R. 1997. Ecosystem appropriation by cities. *Ambio* 26: 167-172.
- Folke, C., J. Colding, et al. 2003. Synthesis: Building resilience and adaptive capacity in social-ecological systems. En: F. Berkes, J. Colding & C. Folke (Eds.). *Navigating social-ecological systems. Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. Pp. 352-387.
- Folke, C., S. Carpenter, B. Walter, M. Scheffer, T. Elmqvist, et al. 2004. Regime shifts, resilience and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review in Ecology, Evolution and Systematics* 35: 557-581.
- Foster, D., D. Orwig & J. McLachlan. 1996. Ecological and conservation insights from retrospective studies of old-growth forests. *Trends in Ecology and Evolution* 11: 419-424.
- Foster, D., F. Swanson, J. Aber, I. Burke, N. Brokaw, et al. 2003. The importance of land-use legacies to ecology and conservation. *BioScience* 53:77-88.
- Foster, D.R. 1992. Land-use history (1730-1990) and vegetation dynamics in central New England, USA. *Journal of Ecology* 80: 753-772.
- Foster, D.R. 1993. Land-use history and forest transformations in Central New-England. En: McDonnell, M.J. & S.T.A. Pickett (Eds.). 1993. *Humans as Components of Ecosystems*. Springer Verlag, Nueva York NY, EUA. Pp. 91-110.
- Foster, D.R. 2000. Conservation lessons and challenges from ecological history. *Forest History Today*. Otoño: 2-11.
- Foster, D.R., P.K. Schoemaker & S.T.A. Pickett. 1990. Insights from Paleocology to community ecology. *TREE* 5 (4): 119-122.
- Foster, D., F. Swanson, J. Aber, I. Burke, N.A. Brokaw, D. Tilman & A. Knapp. 2003. The importance of land-use to ecology and conservation. *BioScience* 55 (1): 77-88.
- Foubert-Corona Z.C. 1998. *Variación de la estructura comunitaria coralina del arrecife de Cabo Pulmo entre 1987 y 1997*. Tesis Biol. Mar. UABCS, La Paz, Baja California Sur, México.
- Franklin, J.F. 1997. Ecosystem management: an overview. En: M.S. Boyce & A. Haney (Eds.) *Ecosystem management*. Yale University Press, New Haven, Connecticut, EUA.
- Franco-Gordo, C., Suárez-Morales, E. Godínez-Domínguez & Flores-Vargas, R. 2001a. A seasonal survey of the fish larvae community of the central Pacific coast of México. *Bulletin of Marine Science*. 68: 383-396.
- Franco-Gordo, C., E. Godínez-Domínguez & E. Suárez-Morales E. 2001b. Zooplankton biomass variability in the Mexican eastern tropical Pacific. *Pacific Science*. 55(2): 191-202.
- Franco-Gordo, C., E. Godínez-Domínguez & E. Suárez-Morales E. 2002. Larval fish assemblages in waters off the Central Pacific coast of México. *Journal of Plankton Research*. 24(8): 725-784.
- Franco-Gordo, C., E. Godínez-Domínguez & E. Suárez-Morales E. 2003. Diversity of ichthyoplankton in the central Mexican Pacific: A seasonal Survey. *Estuarine Coastal Shelf Science*. 57: 111-121.
- Franco-Gordo, C., R. Flores-Vargas, C. Navarro-Rodríguez, R. Funes-Rodríguez & Saldierna-Martínez. 1999. Ictioplankton de las costas de Jalisco y Colima, México (diciembre de 1995 a diciembre de 1996). *Ciencias Marinas*. 25(1): 107-118.
- Franklin, J.F., C.S. Bledsoe & J.T. Callahan. 1990. Contributions of the long-term ecological research program. *BioScience* 40(7): 509-523.
- Frelich, L.E. 2002. *Forest dynamics and disturbance regimes*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Fry, B. 2006. *Stable Isotope Ecology*. Springer, Nueva York, NY, EUA.
- Galicia, L. 1992. Influencia de la variabilidad de la forma de la pendiente en las propiedades físicas del suelo y su capacidad de retención de agua, en una cuenca tropical estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, DF.
- Galicia, L., F. García-Oliva & J. López-Blanco. 1995. Efecto de la estructura jerárquica del relieve en la distribución de las características físicas de los suelos en una cuenca tropical estacional mexicana. *Investigaciones Geográficas Boletín* 3:53-65.
- Galicia L., J. López-Blanco, A. E. Zarco-Arista, V. Filip & F. García-Oliva. 1999. The relationship between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico. *Catena* 36: 153-164.
- Gallopin, G.C., P. Gutman & H. Maletta. 1989. Global impoverishment, sustainable development and the environment: a conceptual approach. *International Social Science Journal* 121:375-397.

- Galloway, J. N., F. J. Dentener, D. G. Capone, E. W. Boyer, R. W. Howarth, S. P. Seitzinger, G. P. Asner, C. C. Cleveland, P. A. Green, E. A. Holland, D. M. Karl, A. F. Michaels, J. H. Porter, A. R. Townsend & C. J. Vorosmarty. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry* 70: 153-226.
- Galloway, J. N., J. D. Aber, J. W. Erisman, S. P. Seitzinger, R. W. Howarth, E. B. Cowling & B. J. Cosby. 2003. The nitrogen cascade. *Bioscience* 53: 341-356.
- Galván-Piña, V.H. 2005. Impacto de la pesca en la estructura, función y productividad del ecosistema de la plataforma continental de las costas de Jalisco y Colima, México. Tesis de doctorado. Cicimar-Instituto Politécnico Nacional, México.
- García, E. 2004. *Medio ambiente y sociedad*. Alianza Editorial, Madrid, España. 356 pp.
- García, R. 2006. *Sistemas complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*. Gedisa. Barcelona, España.
- García-Arévalo, A. 2002. Vascular plants of the Mapimí Biosphere Reserve, México: A checklist. *SIDA* 20: 797-807.
- García-Martino, A.R., G.S. Warner, F.N. Scatena, & D.L. Civco. 1996. Rainfall, runoff, and elevation relationships in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science* 32: 413-424.
- García-Méndez, G., J.M. Maass, P. Matson & P. Vitousek. 1991. Nitrogen transformations and nitrous oxide flux in a tropical deciduous forest in México. *Oecologia* 88: 362-366.
- García-Méndez, G., J. M. Maass, P. Matson & P. Vitousek. 1992. Transformaciones de nitrógeno y flujos de óxido nitroso en un bosque tropical decido. *Ciencias* 43 (Número Especial): 49-52.
- García-Oliva, F., A. Camou & J. M. Maass. 2002. El clima de la Región Central de la costa del Pacífico Mexicano. En: F.A. Noguera, J.H. Vega, A.N. García-Aldrete & M. Quesada (Eds.) *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México, DF. Pp. 3-10.
- García-Oliva, F., I. Casar, P. Morales & J. M. Maass. 1994. Forest-to-pasture conversion influences on soil organic carbon dynamics in a tropical deciduous forest. *Oecologia*. 99: 392-396.
- García-Oliva, F., E. Ezcurra & L. Galicia 1991. Pattern of rainfall distribution in the Central Pacific coast of Mexico. *Geografiska Annaler* 73A(3 4): 179- 186.
- García-Oliva, F. & J.M. Maass. 1998. Efecto de la transformación de la selva a pradera sobre la dinámica de los nutrientes en un ecosistema tropical estacional en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 62: 39-48.
- García-Oliva, F., J.M. Maass & L. Galicia. 1995. Rainstorm analysis and rainfall erosivity of a seasonal tropical region with a strong cyclonic influence on the Pacific coast of Mexico. *Journal of Applied Meteorology* 34: 2491-2498.
- García-Oliva, F., R.L. Sanford Jr. & E. Kelly. 1999. Effects of Slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest. *Geoderma* 88 (1-2): 1-12.
- García-Oliva, F., B. Sveshtarova & M. Oliva 2003. Seasonal effects on soil organic matter dynamics in a tropical deciduous forest ecosystem in western Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 19: 179-188.
- García-Real, E. & L.E. Rivera-Cervantes. 1998. Inventario de coleópteros Melolonthidae (Lamellicornia) asociados a los bosques tropicales caducifolios y subcaducifolios de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima, México. En: M.A. Morón & A. Aragón (Eds.). *Avances en el estudio de la diversidad, importancia y manejo de los coleópteros edafícolas americanos*. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla-Sociedad Mexicana de Entomología. Puebla, México. Pp. 71-78.
- García-Ruvalcaba, S., E.J. Jardel P., S.H. Graf M., E. Santana C., L.M. Martínez R. & G. Pérez-Carrillo. 2009. Educación ambiental y manejo de ecosistemas en la región de la Sierra de Manantlán. En: A. Castillo & E. González-Gaudiano (Coords.) *Educación ambiental y manejo de ecosistemas en México*. Instituto Nacional de Ecología y Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF. Pp. 71-102.
- Gardner, R.H., W.M. Kemp, V.S. Kennedy, & J.E. Petersen. 2001. *Scaling relations in experimental ecology*. Columbia University Press, Nueva York, NY, EUA.
- Gascon, C., T.E. Lovejoy, R. Bierregaard, J.R. Malcolm, P. Stouffer, H. Vasconcelos, W. Laurance, B. Zimmerman, M. Tocher & S. Borges. 1999. Matrix habitat and species richness in tropical forest remnants. *Biological Conservation* 91:223-229.
- Gehlhausen, S.M., M.W. Schwartz & C.K. Augspurger. 2000. Vegetation and microclimatic edge effects in two mixed-mesophytic forest fragments. *Plant Ecology* 147 (1): 21-35.
- Georgescu-Roegen, N. 1971. *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press. Cambridge, EUA.

- Gerritsen, P.R.W. 2002. *Diversity at stake. A farmers perspective on biodiversity and conservation in Western Mexico*. Circle for Rural European Studies, Wageningen Universiteit, Wageningen, Países Bajos.
- Gholz, H.L. 1982. Environmental limits on aboveground net primary production, leaf area, and biomass in vegetation zones of the Pacific Northwest. *Ecology* 63, 469-481.
- Glenn-Lewin, D.C. & E. van Der Maarel. 1992. Patterns and processes of vegetation dynamics. En: D.C. Glenn-Lewin & E. van Der Maarel (Eds.) *Plant succession. Theory and prediction*. Chapman & Hall, Londres, Reino Unido. Pp. 11-59.
- Godínez, C. 2003. Percepciones del sector turismo sobre el ambiente, los servicios ecosistémicos y las instituciones relacionadas con la conservación del ecosistema de selva baja caducifolia en la costa sur de Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Iztacala UNAM, México, DF.
- Godínez-Domínguez, E., J.A. Rojo-Vázquez, V.H. Galván-Piña & B. Aguilar-Palomino. 2000. Changes in the structure of a coastal fish assemblage exploited by a small scale gillnet fishery during an El Niño-La Niña event. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 51: 773-787.
- Godínez-Domínguez, E. & J. Freire. 2003. Information-theoretic approach for selection of spatial and temporal models of community organization. *Marine Ecology Progress Series*. 253, 17-24.
- Goldenberg, S. B., C.W. Landsea, A.M. Mestas-Nunez, & W.M. Gray. 2001. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science* 293:474-479.
- Goldsmith, B. *Monitoring for conservation and ecology*. Chapman and Hall, Londres, Reino Unido.
- Golley, F.B., J.T. McGinnis, R.G. Clements, G.I. Child & M.J. Duever. 1975. *Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem*. University of Georgia Press. Athens, EUA.
- Golley, F.B. 1993. *A history of the ecosystem concept in ecology*. Yale University Press. New Haven, Connecticut, EUA.
- Gómez, A. 2008. La transmisión del conocimiento ambiental de las mujeres hacia los niños de nivel preescolar en una comunidad aledaña a la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. México, DF.
- Gómez-Pompa, A. & S. Del Amo (Eds.). 1985. *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz*. Vol. II. Alambra Mexicana. México DF, México.
- Gómez-Pompa, A., C. Vázquez-Yanes, S. Del Amo & A. Butanda (Eds.) 1976. *Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz*. Compañía Editorial Continental. México DF, México.
- González, M.G. 1990. Importancia ecológica del rocío en la selva baja caducifolia de Chamela, Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México, DF.
- González-Bernaldez, F. 1981. *Ecología y paisaje*. Blume, Madrid, España.
- González-Flores, P.C. 1992. El manejo del fuego en el sistema de roza, tumba y quema en la selva baja caducifolia de Chamela, Jalisco. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México, DF.
- González-Ruiz, T. 1997. Efecto de la humedad del suelo en la biomasa microbiana de un ecosistema tropical estacional. Tesis de Licenciatura. ENEP Iztacala, UNAM, México, DF.
- González-Ruiz, T. 2001. Fijación simbiótica de nitrógeno por leguminosas de un ecosistema tropical estacional. Tesis de Maestría. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México, DF.
- González-Soriano, E., R. Dirzo & R.C. Vogt. 1997. *Historia natural de Los Tuxtlas*. Conabio. México, DF.
- Gosz, J.R. 1996. International long-term ecological research: priorities and opportunities. *TREE* 11:4-44.
- Gosz, J.R. 1999. Ecology Challenged? Who? Why? Where is this headed? *Ecosystems* 2: 475-481.
- Graf, S.H., E. Santana C., E.J. Jardel & B.F. Benz. 1995. La Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán: un balance de ocho años de gestión. En: La Conservación Biológica en México. *Revista de la Universidad de Guadalajara*, marzo-abril: 55-60.
- Graf, S.H., E. Santana C., E.J. Jardel, M. Gómez & S. García-Ruvalcaba. 2003. La Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. En: J. Carabias, J. de la Maza & R. Cadena (Coord.) *Capacidades necesarias para el manejo de áreas protegidas. América Latina y el Caribe*. The Nature Conservancy-World Commission on Protected Areas, UICN. México, DF. Pp. 135-153.
- Graf M., S.H., E. Santana C., L. Martínez R., S. García R. & J.J. Llamas L. 2006. Collaborative governance for sustainable water resources management: the experience of the Inter.-municipal Initiative for the Integrated Management of the

- Ayuquila River Basin, Mexico. *Environment and Urbanization* 18(2): 297-313.
- Gragson, T.L. & M. Grove. 2005. Social science in the context of the Long Term Ecological Research Program. *Society and Natural Resources* 19: 93-100.
- Green, D.G. 1982. Fire and stability in the postglacial forests of southwest Nova Scotia. *Journal of Biogeography* 9:29-40.
- Greig-Smith, P. 1983. *Quantitative Plant Ecology*. Butterworths Scientific, Londres, Reino Unido.
- Grime, J.P. 2002. *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties*. John Wiley, Nueva York, NY, EUA.
- Grissino-Mayer, H.D. 1995. Tree ring reconstructions of climate and fire history at El Malpais National Monument, Nuevo México. Tesis Doctoral. Universidad de Arizona. Tucson, Arizona.
- Grissino-Mayer, H.D. 1999. Modeling fire interval data from the American Southwest with the Weibull distribution. *International Journal of Wildland Fire* 9: 37-50.
- Grissino-Mayer, H.D. 2001. FHX2-software for analyzing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. *Tree-Ring Research* 57: 115-124.
- Grissino-Mayer, H.D. 2005. *The Ultimate Tree~Ring Web Pages*. En línea: <http://web.utk.edu/~grissino/principes.htm>.
- Groffman, P.M., C.T. Driscoll, G.E. Likens, T.J. Fahey, R.T. Holmes, C. Eagar & J.D. Aber. 2004. Nor gloom of night: a new conceptual model for the Hubbard Brook Ecosystem Study. *BioScience* 54: 139-148.
- Grünberger O., V.M. Reyes-Gómez, J.L. Janeau, 2005. Las playas del desierto Chihuahuense, influencia de las sales en ambientes árido y semiárido. IRD-Inecol, Xalapa, Veracruz, México.
- Guevara S., S., J. Laborde D. & G. Sánchez-Ríos. 2004. *Los Tuxtlas. El paisaje de la Sierra*. Instituto de Ecología, AC. Xalapa, Veracruz, México.
- Guinotte, J.M. & V.J. Fabry. 2008. Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1134:320-342.
- Gunderson, L.H., C.S. Holling & S.S. Light (Eds). 1995. *Barriers and bridges to the renewal of ecosystems and institutions*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Gunderson, L. H. & C. H. Holling (Eds.) 2002. *Panarchy. Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press. Washington DC, EUA.
- Gunderson, L.H. & C.R. Allen. 2010. *Why resilient? Why now*. En: L.H. Gunderson, C.R. Allen & C.S. Holling (Eds.). *Foundations of ecological resilience*. Island Press, Washington DC, EUA. Pp. 3-18.
- Gutiérrez-Alcalá, A.R. 1993. La ganadería extensiva en el trópico seco mexicano: causas, consecuencias y manifestaciones en su medio social. Tesis de Licenciatura, UNAM, México, DF.
- Glynn, P.W. 1988. El Niño-Southern Oscillation 1982-83: nearshore population, community and ecosystem responses. *Annual Review of Ecology and Systematics* 19: 309-345.
- Glynn, P.W. 2000. Effects of the 1997-98 El Niño-Southern Oscillation on eastern Pacific corals and coral reefs: an overview. 2: 1169-1174. *Proceedings 9th International Coral Reef Symposium*, Bali, Indonesia.
- Glynn, P.W. & G.E. Leyte Morales. 1997. Coral reefs of Huatulco, west Mexico: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Rev. Biol. Trop.* 45: 1033-1047. Universidad de Costa Rica, San José.
- Haberl, H., V. Winiwarter, K. Andersson, R. U. Ayres, C. Boone, A. Castillo, G. Cunfer, M. Fischer-Kowalski, W. R. Freudenburg, E. Furman, R. Kaufmann, F. Krausmann, E. Langthaler, H. Lotze-Campen, M. Mirtl, C. L. Redman, A. Reenberg, A. Wardell, B. Warr & H. Zechmeister. 2006. From LTER to LTSER: conceptualizing the socioeconomic dimension of long-term socioecological research. *Ecology and Society* 11(2): 13. En línea: www.ecologyandsociety.org/vol11/iss2/art13/
- Hairton, W.G. 1989. *Ecological experiments*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Halffter, G. 1981. The Mapimí Biosphere Reserve: local participation in conservation and development. *Ambio* 10 (2-3): 93-96.
- Halffter, G. 1987. Biogeography of the montane entomofauna of Mexico and Central America. *Annual Review of Entomology* 32: 95-114.
- Halffter, G. 1988. El concepto de reserva de la biosfera. En: C. Montaña (Ed.) *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología AC. México, DF, México. Pp. 19-44.
- Halffter G., J. Soberón, P. Koleff & A. Melic (Eds.). 2005. *Sobre diversidad biológica: el significado de las diversidades Alfa, Beta y Gamma*. M3m-Monografías Tercer Milenio. Vol. 4. SEA, Conabio, Diversitas & Conacyt, Zaragoza, España.

- Halffter, G., C.E. Moreno & E.O. Pineda. 2001. *Manual para evaluación de la biodiversidad en Reservas de la Biosfera*. Manuales y Tesis SEA (Sociedad Entomológica Aragonesa). Vol. 2. Zaragoza, España.
- Hall, R. O., T. S.E. & E. E. Gaiser. 2007. Measuring primary production in freshwater ecosystems. En: T. J. Fahey & A. K. Knapp (Ed.) *Principles and Standards for Measuring Net Primary Production in Long-Term Ecological Studies*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido. Pp. 175-203.
- Hamburg, S.P. & R.L. Sanford. 1986. Disturbance, *Homo sapiens*, and ecology. *Bulletin of the Ecological Society of America* 67: 169 - 171
- Hannign, J.A. 1995. *Environmental sociology. A social constructionist perspective*. Routledge. Londres, Reino Unido.
- Hansen, A. J. & F. Di Castri (Eds.). 1992. *Landscape Boundaries. Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*. Ecological Studies, Vol. 92. Springer Verlag. Nueva York NY, EUA.
- Harmon, M.E., J.F. Franklin, F.J. Swanson, P. Sollins, S.V. Gregory, J.D. Lattin, N.H. Anderson, S.P. Cline, N.G. Aumen, J.R. Sedell, G.W. Lienkaemper, K. Cromack & K.W. Cummins. 1986. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems. *Advances in Ecological Research* 15: 133-302.
- Harper, K.A., S.E. Macdonald, P.J. Burton, J. Chen, K.D. Brosofske, S.C. Saunders, E.S. Euskirchen, D. Roberts, M.S. Jaiteh & P. Essen. 2005. Edge influence in forest structure and composition in fragmented landscapes. *Conservation Biology* 19: 768-782.
- Harrington, S. 2005. Measuring Forest Fuels: An Overview of Methodologies. Forest Guild Research Center. Working Paper 22.
- Harris, L.D. 1984. *The fragmented forest: island biogeography theory and the preservation of biotic diversity*. University of Chicago Press, Chicago.
- Hasselmann, K., H.J. Schellhuber, & O. Edenhofer. 2004. Climate change: complexity in action. *Physics World* 17:31-35.
- Hasselmann, K., M. Latif, G. Hooss, C. Azar, O. Edenhofer, C.C. Jaeger, O.M. Johannessen, C. Kemfert, M. Welp, & A. Wokaun. 2003. The challenge of long-term climate change. *Science* 302: 1923-1925.
- Hawley, A.H. 1991. *Teoría de la ecología humana*. Tecnos, Madrid, España.
- Heckenberger, M. J., A. Kuikuro, U.T. Kuikuro, J.C. Russell, M. Schmidt, C. Fausto, & B. Franchetto. 2003. Amazonia 1492: Pristine forest or cultural parkland? *Science* 301:1710-1714.
- Hector, A., B. Schmid, C. Beierkuhnlein, M.C. Caldeira, M. Diemer *et al.* 1999. Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science* 286: 1123-1127
- Henne, L.J., D.W. Schneider & L.M. Martínez-Rivera. 2002. Rapid assessment of organic pollution in a West-central Mexican river using family-level biotic index. *Journal of Environmental Planning and Management* 45(5): 613-632.
- Hernández, L., H. Barral & E. Anaya. 1996. Resurgence d'un type s'élevage du XVIII siècle, dans le Nord du Mexique. *Cahiers des Sciences Humaines* 32: 65-84.
- Hernández, L., H. Barral & M. Vallebuena. 2001. El ganado asilvestrado o mesteño en el Bolsón de Mapimí, Durango, México. En: L. Hernández (Compiladora) *Historia ambiental de la ganadería en México*. IRD-Inecol, Durango, México. Pp. 59-67.
- Hernández, L., A. González-Romero, J.W. Laundré, D. Lightfoot, E. Aragón & J. López-Portillo. 2005. Changes in rodent community structure in the Chihuahuan Desert México: Comparisons between two habitats. *Journal of Arid Environments*. 60:239-257.
- Hernández, L., J.W. Laundré, A. González-Romero, J. López-Portillo, G.L. Portales, A. García, K.M. Grajales & J.M. Martínez. 2007. Plant productivity, predation, and the abundance of black-tailed jackrabbits in the Chihuahuan desert of Mexico. *American Society of Mammalogists 87th Annual Meeting*. 8 al 10 de junio del 2007. Museum of Southwestern Biology, University of New Mexico, Albuquerque, Nuevo Mexico, EUA.
- Hernández, L., E.F. Balart & H. Reyes-Bonilla. 2009. Checklist of reef decapod crustacean (*Crustacea: Decapoda*) in the southern Gulf of California, México. *Zootaxa* 2119: 39-50.
- Hernández-Vázquez, S., R.E. Salas., B.C.D. Martínez & L.F.A. Ramos. 1999. Primer registro del carrao (*Aramus guarauna*) en la costa de Jalisco, México. *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas* 33(2):93-99.
- Hernández-Vázquez, S. & G. Fernández, A. 1999. Reproduction of *Cochlearius cochlearius* (Boat-Billed Heron) and *Butorides virescens* (Green-Backed Heron) in La Manzanilla, Jalisco, México. *Ciencias Marinas* 25(2):277-291.
- Hernández-Vázquez, S. 2000. Aves acuáticas del estero La Manzanilla, Jalisco, México. *Acta Zoológica Mexicana, nueva serie*. 80, 143-153.

- Hernández-Vázquez, S. & E. Mellink. 2001. Coastal waterbirds of El Chorro and Majahuas, México, during the non-breeding season, 1995-1996. *Biología Tropical* 49(1):357-365.
- Hernández-Vázquez, S., H. De La Cueva-Salcedo, & J. Rojo-Vázquez. 2002. Análisis comparativo de la avifauna del estero Majahuas (Jalisco, México) entre un evento El Niño y un año no Niño. *Boletín del Centro de Inv. Biol.* 36(1): 94-112.
- Hernández-Vázquez, S. 2005. Comparative study of diurnal raptors at two locations along the coast of Jalisco: Playon de Mismaloya and the peninsula El Tamarindo. 83-104 pp. *En*: R. Rodríguez-Estrella (editor). *Current raptors studies in Mexico*. México. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF.
- Hernández-Xolocotzi, E. 1970. Exploración etnobotánica y su metodología. *Xolocotzia* 1: 163-188.
- Herrera-Silveira, J. A., I. Medina-Gomez & R. Colli. 2002. Trophic status based on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia* 475: 91-98.
- Herrera-Silveira, J.A., M. Martín & V. Díaz-Arce. 1999. Phytoplankton variations in four coastal lagoons, Yucatan, Mexico. *Revista de Biología Tropical* 47: 47-56.
- Herrick, J. E. & J. Sarukhán. 2007. A strategy for ecology in an era of globalization. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:172-181.
- Herrero Pérezrul, M.D., H. Reyes Bonilla, A. González Azcárraga, C. E. Cintra Buenrostro & A. Rojas Sierra. En prensa. *En*: E. Ezcurra & G. Danemann (eds.). *Bahía de los Angeles: recursos naturales y comunidad. Línea de base 2005*. Pronatura-Instituto Nacional de Ecología, Ensenada, Baja California, México.
- Hesse, I. D., J. W. Day, & T. W. Doyle. 1998. Long-term growth enhancement of baldcypress (*Taxodium distichum*) from municipal wastewater application. *Environmental Management* 22: 119-127.
- Heyer, R., M.A. Donnelly, R.W. McDiarmid, L.C. Hayek & M. Foster. 1994. *Measuring and monitoring biological diversity: standard methods for amphibians*. Smithsonian Institution Press, Washington, DC, EUA.
- Heywood, V. 1996. *Global biodiversity assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the World's coral reefs. *Marine and Freshwater Research* 50: 839-866.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability in ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
- Holling, C.S. 1978. *Adaptive environmental assessment and management*. Blackburn, Caldwell, NJ, EUA.
- Holling, C.S. 1986. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change. *En*: W.C. Clark & R.E. Munn (Eds.). *Sustainable development of the biosphere*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. Pp. 292-317.
- Holling, C.S. 1996. Engineering resilience versus ecological resilience, *En*: Schulze, P. (Ed.). *Engineering within ecological constraints*. National Academy, Washington DC, EUA. Pp. 31-44.
- Holling, C. & G.K. Meffe. 1996. Command and Control and the Pathology of Natural Resource Management. *Conservation Biology* 10: 328-337.
- Hooper, D.U., F.S. Chapin III, J.J. Ewel, A. Hector, P. Inchausti, *et al.* 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological Monographs* 75:3-35.
- Hopkinson, C.S. & J.W. Day. 1977. A model of the Barataria Bay salt marsh ecosystem. *En*: C.A.S. Hall & J.W. Day (Eds.) *Ecosystem modeling in theory and practice: an introduction with case histories*. John Wiley & Sons. Nueva York, NY, EUA. Pp. 235-266.
- Horn, S.P.; Orvis, K.H.; Kennedy, L.M.; Clark, G.M. 2000. Prehistoric fires in the highlands of the Dominican Republic: evidence from charcoal in soils and sediments. *Caribbean Journal of Science* 36(1-2): 10-18.
- Houghton, J.T. & L.G. Meira Filho. 1995. *The IPCC Report on Radiative Forcing of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Houghton, R.A., E.A. Davidson & G.M. Woodwell. 1998. Missing sinks, feedbacks, and understanding the role of terrestrial ecosystems in the global carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles* 12:25-34.
- Howarth, R. W. & R. Marino. 2006. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: Evolving views over three decades. *Limnology and Oceanography* 51:364-376.
- Howarth, R.W. 2005. The development of policy approaches for reducing nitrogen pollution to coastal waters of the USA. *Science in China Series C-Life Sciences* 48: 791-806.

- Howarth, R.W. & A.F. Michaels. 2000. The measuring of primary production in aquatic ecosystems. En: Fahey T.J. & A.K. Knapp (Eds.). *Introduction: Methods in ecosystem science: progress, tradeoffs, and limitations*. Springer, Nueva York, NY, EUA. Pp. 72-85.
- Howarth, R.W., D.P. Swaney, E.W. Boyer, R. Marino, N. Jaworski, & C. Goodale. 2006. The influence of climate on average nitrogen export from large watersheds in the Northeastern United States. *Biogeochemistry* 79: 163-186.
- Howarth, R.W., D.P. Swaney, E.W. Boyer, R. Marino, N. Jaworski, & C. Goodale. 2006. The influence of climate on average nitrogen export from large watersheds in the Northeastern United States. *Biogeochemistry* 79: 163-186.
- Huber-Sannwald E., F. Álvarez, E. Escobar, J. Herrera & D. Valdés. 2008. Ciclos de nutrientes en el cambio ambiental global. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215:50-56.
- Huggett, R.J. 1995. *Geoecology*. Routledge. Londres, Reino Unido.
- Hughes, R.F., J.B. Kauffman & V. Jaramillo. 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology* 80:1892-1907.
- Hulbert, S.H. 1984. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological Monographs* 54:187-211.
- Hunter, M.L. 1996. *Fundamentals of Conservation Biology*. Blackwell, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Huston, M.A. 1994. *Biological diversity: the coexistence of species*. Cambridge Studies in Ecology, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Hutto R.L. *et al.* 1986. A fixed radius point count method for non-breeding and breeding season use. *The Auk* 103: 593-602.
- Iglesias Prieto, R., J.L. Matta, W.A. Robbins & R.K. Trench. 1992. Photosynthetic response to elevated temperature in the symbiotic dinoflagellate *Symbiodinium microadriaticum* in culture. *PNAS* 89: 302-305.
- Iglesias Prieto, R., V.H. Beltrán, T. La Jeunesse, H. Reyes Bonilla & P.E. Thomé. 2004. Different algal symbionts explain the vertical distribution of dominant reef corals in the eastern Pacific. *Proceedings of the Royal Society of London, series B* 271: 1757-1763.
- Iltis, H.H., J.F. Doebley, R. Guzmán & B. Pazy. *Zea diploperennis* (Gramineae): A new teosinte from Mexico. *Science* 203: 186-188.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). 2000. *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán*. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México, DF.
- Infante, M.D., P. Moreno-Casasola & C. Madero-Vega. 2008. Litterfall productivity of tropical swamps in the central coastal plains of the Gulf of Mexico. Capitalizing on Wetlands International Conference. The Society of Wetlands Scientists. Mayo 26-30.
- Iñiguez Dávalos, L.I. & E. Santana C. 1993. Patrones de distribución y riqueza de especies de los mamíferos del occidente de México. En: R. Medellín & G. Ceballos (Eds.). *Avances en el estudio de los mamíferos de México* Asociación Mexicana de Mastozoología, AC. Publicaciones especiales, Vol. 1. México, DF. Pp. 65-86.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001a. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. En: McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White (Eds). *Contribution of Working Group II to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001b. Climate Change 2001: Mitigation. En: Metz, B., O. Davidson, R. Swart & J. Pan (Eds). *Contribution of Working Group III to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001c. Climate Change 2001: The Scientific Basis. En: Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden & D. Xiaosu. *Contribution of Working Group I to the third assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis*. International Panel on Climate Change, Ginebra, Suiza.
- Jain, A. K., T. O. West, X. J. Yang & W. M. Post. 2005. Assessing the impact of changes in climate and CO₂ on potential carbon sequestration in agricultural soils. *Geophysical Research Letters* 32: L19711, doi:10.1029/2005GL023922.
- Janeau, J.L., R.R. Esparza-Villarreal, 1992. Cartographie des états de surface d'une toposequence du bassin versant San Ignacio. Le milieu physique.. En : Delhoume J.P, Maury M.E. (Eds.). *Actas del seminario Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. Xalapa, Veracruz, México. Pp. 161-176.

- Janzen, H. H. 2004. Carbon cycling in earth systems - a soil science perspective. *Agriculture Ecosystems & Environment* 104: 399-417.
- Jaramillo, V. J. & R.L. Sanford Jr. 1995. Nutrient cycling in tropical deciduous forests. En: S.H. Bullock, H.A. Mooney & E. Medina (Eds). *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA. Pp. 346-361.
- Jaramillo, V. J., Kauffman, J.B., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D.L. & Ellingson, L.E. 2003. Biomass, Carbon and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems* 6: 609-629.
- Jardel, E.J. 1991. Perturbaciones naturales y antropogénicas y su influencia en la dinámica sucesional de los bosques de Las Joyas, Sierra de Manantlán, Jalisco. *Tiempos de Ciencia* 22: 9-26.
- Jardel, E.J. (Coord.). 1992. *Estrategia para la conservación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán*. Editorial Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.
- Jardel, E.J. 1998. Efectos ecológicos y sociales de la explotación maderera de los bosques de la Sierra de Manantlán. En: Ávila, R., J.P. Emphoux, L.G. Gastélum, S. Ramírez, O. Schöndube & F. Valdez (Eds.). *El Occidente de México: arqueología, historia y medio ambiente. Perspectivas regionales*. Actas del IV Coloquio Internacional de Occidentalistas. Universidad de Guadalajara/ Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación (ORSTOM). Guadalajara, Jal. Pp. 231-251.
- Jardel, E.J. 2000. *Sociedad, ecología, recursos naturales y sustentabilidad*. Universidad de Guadalajara. Autlán, Jalisco, México.
- Jardel, E.J. 2008. Sucesión ecológica y restauración de bosques subtropicales de montaña en la Estación Científica Las Joyas, México. En: M. González-Espinosa, J.M. Rey-Benayas & N. Ramírez-Marcial (Eds.) *Restauración de Bosques en América Latina*. Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas y Mundi-Prensa. México, DF. Pp. 77-97.
- Jardel P., E.J. & B.F. Benz. 1997. El conocimiento tradicional sobre el manejo de los recursos naturales y la diversidad biológica. En: E. Florescano (Ed.). *El patrimonio nacional de México*. Fondo de Cultura Económica, México, DF. Pp. 193-231.
- Jardel, E.J., E. Santana C. & S.H. Graf. 1996. The Sierra de Manantlan Biosphere Reserve: conservation and regional sustainable development. *Parks* 6(1): 14-22.
- Jardel, E.J., L. M. Martínez-Rivera, J.M. Ramírez-Romero & D. Partida-Lara. 2004a. Condiciones físico geográficas de Las Joyas y sus alrededores. En: R. Cuevas-Guzmán & E.J. Jardel (Editores). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. Pp. 49-64
- Jardel, E.J., E. Ezcurra, R. Cuevas-Guzmán, A.L. Santiago-Pérez & P. Cruz C. 2004b. Vegetación y patrones del paisaje. En: R. Cuevas-Guzmán & E.J. Jardel (Editores). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. Pp. 81-135
- Jardel, E.J., A.L. Santiago-Pérez, C. Cortés-Montaño & F. Castillo-Navarro. 2004c. Sucesión y dinámica de rodales. En: R. Cuevas-Guzmán & E.J. Jardel (Editores). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jal. Pp. 1-4.
- Jardel, E.J., S.H. Graf, E. Santana C. & M. Gómez G. 2004d. Managing core zones in mountain protected areas in México: The Sierra de Manantlán Biosphere Reserve. En: L. Hamilton, G. Worboys & D. Harmon (Eds.). *Mountain Protected Areas: Linking protected areas among the mountain range*. Andromeda Editrice. Teramo, Italia. Pp. 211-224.
- Jardel, E.J., E. Santana C. & S.H. Graf. 2006a. Investigación científica y manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán. En: K. Oyama & A. Castillo (Coord.) *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México*. Siglo XXI-Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF. Pp. 127-153.
- Jardel P., E.J., R. Ramírez-Villeda, F. Castillo-Navarro, S. García-Ruvalcaba, O.E. Balcázar M, J. C. Chacón M. & J. E. Morfín R. 2006. Manejo del Fuego y restauración de bosques en Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. En: Flores G., J.G. & D.A. Rodríguez-Trejo (Eds.) *Incendios forestales*. Mundi Prensa y Conafor. México, DF, y Madrid. Pp. 216-242.
- Jardel E., M. Mass, A. Castillo, R. García, L. Porter, J. Sosa & A. Burgos. 2008. Manejo de ecosistemas e investigación a largo plazo. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215: 30-37.
- Jardel, E.J., E. Alvarado, J.E. Morfín-Ríos, F. Castillo-Navarro & J.G. Flores-Garnica. 2009. Regímenes de incendios en ecosistemas forestales de México. En: J.G. Flores-Garnica (Ed.). *Impacto ambiental de incendios forestales*. Mundi-Prensa, Instituto Nacional de Investigaciones

- Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Colegio de Postgraduados. México, DF. Pp. 73-100.
- Jeffries, D.S. & N. Foster. 2001. The Turkey Lakes Watershed Study: Milestone and prospects. *Ecosystems* 4: 501-502.
- Jiménez, J. J., & R. Lal. 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Critical Reviews in Plant Sciences* 25: 337-365.
- Jones, P.D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *Journal of Climatology* 7: 1794-1802.
- Jongman R., C. ter Braak & O. van Tongren (Eds.). 1995. *Data analysis in community and landscape ecology*. 2 Ed. Cambridge University Press. Nueva York, NY, EUA.
- Jørgensen, S.V. (Ed.) 2009. *Ecosystem Ecology*. Elsevier, Amsterdam, Países Bajos.
- Justic, D., N. N. Rabalais & R. E. Turner. 2005. Coupling between climate variability and coastal eutrophication: Evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research* 54:25-35.
- Karanth, K.U. & J.D. Nichols. 1998. Estimation of tiger densities in India using photographic captures and recaptures. *Ecology* 79: 2852-2862.
- Kareiva, P. 1994. Higher order interactions as a fail to reductionist ecology. *Ecology* 76: 1527-1528.
- Kareiva, P. 1998. Insect pestilence and the futility of simple explanations. *Integrative Biology* 1: 163-165.
- Kauffman, J.B., D.L. Cummings & D.E. Ward. 1998. Fire in the Brazilian Amazon. 2. Biomass, nutrient pools and losses in cattle pastures. *Oecologia* 113:415-427.
- Kauffman, J.B., K.M. Till & R.W. Shea. 1992. Biogeochemistry of deforestation and biomass burning, En: D.A. Dunnette & R.J. O'Brien (Eds.) *The Science of Global Change: The Impact of Human Activities on the Environment*. American Chemical Society, Washington, DC, EUA. Pp. 426-456.
- Kaus A., 1993. Social realities of environmental ideologies: A case study of the Mapimí Biosphere Reserve. *Culture and Agriculture* 46: 29-34.
- Keeling, C.D., T.P. Whorf, M. Wahlen & J. van der Plicht. 1995. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature* 375: 666-670.
- Kent, M. & P. Coker. 1992. *Vegetation description and analysis*. John Wiley & Sons. Nueva York, NY, EUA.
- King, D. A. 2004. Environment - Climate change science: Adapt, mitigate, or ignore? *Science* 303:176-177.
- King, D. 2005. Climate change: the science and the policy. *Journal of Applied Ecology* 42:779-783.
- Kinzig, A.P., S.W. Pacala & D. Tilman (Eds.). 2001. *The functional consequences of biodiversity*. Princeton University Press. Princeton, Nueva Jersey, EUA.
- Knapp, A. K., J. M. Briggs & D. L. Childers. 2007. Estimating aboveground net primary production in grassland and herbaceous dominated systems. En: T. J. Fahey & A. K. Knapp (Eds.) *Principles and standards for measuring net primary production in long-term ecological studies*. Oxford University Press, Oxford, Reino Unido.
- Knight, D.H., T.J. Fahey & S.W. Running. 1985. Water and nutrient outflow from contrasting lodgepole pine forests in Wyoming. *Ecological Monographs* 55 (1): 29-48.
- Koop, H. 1989. *Forest dynamics*. Springer-Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Kummerow, J., J. Castellanos, J.M. Maass & M. Larigauderie. 1990. Production of fine roots and the seasonality of their growth in a Mexican deciduous dry forest. *Vegetatio* 90: 73-80
- Kupfer, A., R. Langel, S. Scheu, W. Himstedt & M. Maraun. 2006. Trophic ecology of a tropical aquatic and terrestrial food web: insights from stable isotopes. *Journal of Tropical Ecology* 22: 469-476.
- LaJeunesse, T.C., R. Smith, M. Walther, J. Pinzón, D.T. Pettay, M. McGinley, M. Aschaffenburg, P. Medina Rosas, A.L. Cupul Magaña, A. López Pérez, H. Reyes Bonilla & M.E. Warner. 2010. Host-symbiont recombination versus natural selection in the response of coral-dinoflagellate symbioses to environmental disturbance. *Proceedings of the Royal Society of London series B* 277: 2925-2934.
- Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627.
- Lal, R., M. Griffin, J. Apt, L. Lave & M. G. Morgan. 2004. Managing soil carbon. *Science* 304: 393-393.
- Landsea, C. W., G. D. Bell, W. M. Gray, & S. B. Goldenberg. 1998. The extremely active 1995 Atlantic hurricane season: Environmental conditions and verification of seasonal forecasts. *Monthly Weather Review* 126: 1174-1193.
- Lara-Domínguez, A.L., J.W. Day, A. Yáñez-Arancibia & E. Sáinz-Hernández. 2006. A dynamic characterization of water flux through a tropical ephemeral inlet, La Mancha Lagoon, Gulf of Mexico. En: Singh, V.P, & Y.J. Xu (Eds.) *Coastal hydrology and processes*. Water Resources Publications. Pp. 413-422.

- Lara-Domínguez, A.L., E. Sáinz, R. Landgrave, A.B. González, R.A. Marín & J.W. Day. 2009. Evaluación ambiental y de las comunidades de peces en la boca de conexión de la Laguna La Mancha y Laguna el Ostión, Veracruz, Golfo de México. En: Informe final, proyecto de investigación: Evaluación de los recursos naturales y la productividad pesquera de dos lagunas costeras ante el impacto del cambio climático y el ascenso del nivel medio del mar: Laguna La Mancha y Laguna el Ostión, Veracruz, Golfo De México. FOMIX 37014. México, DF.
- Lara-Lara, J.R., V. Arenas, C. Bazán, V. Díaz, E. Escobar, M.C. García, G. Gaxiola, G. Robles, R. Sosa, L.A. Soto, M. Tapia & J.E. Valdez-Holguín. 2008. Los ecosistemas marinos. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, vol. 1: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México. Pp. 135-159.
- Lara-Lara, J.R., J.A. Arreola, L.E. Calderón, V.F. Camacho, G. de la Lanza, A. Escofet, M.I. Espejel, M. Guzmán, L.B. Ladah, M. López, E.A. Meling, P. Moreno-Casasola, H. Reyes, E. Ríos-Jara & J.A. Zertuche. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, Vol. 1: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Conabio, México, DF, México. Pp. 109-134.
- Larkin, N.K. & D.E. Harrison. 2002. ENSO warm (El Niño) and cold (La Niña) event life cycles: ocean surface anomaly patterns, their symmetries, asymmetries, and implications. *Journal of Climate* 15: 1118-1140.
- Laurance, W.F., R. Bierregaard, C. Gascon, R. Didham, A.P. Smith, A. Lynman, V. Viana, T.E. Lovejoy, K. Sieving, J. Sites, M. Andersen, M. Tocher, E. Kramer, C. Restrepo & C. Moritz. 1997. Tropical forest fragmentation: Synthesis of a diverse and dynamic discipline. En: Laurance, W.F., & R. O. Bierregaard (Eds.). *Tropical Forests Remnants: Ecology, Management and Conservation of Fragmented Communities*. University of Chicago Press. Pp. 502-514.
- Leff, E. (Comp.). 1994. *Ciencias sociales y formación ambiental*. Gedisa. Barcelona, España.
- Leff, E. (Coord.). 1986. *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. Siglo XXI. México, DF, México.
- Leff, E. 1998. *Saber ambiental, sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder*. Siglo XXI, México, DF, México.
- Legaria, M.L. 2003. Variación de la comunidad fitoplanctónica y su relación con parámetros físico-químicos en la laguna de la Mancha, Municipio de Actopan, Ver. Tesis de licenciatura. Facultad de Biología, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.
- Leigh, E.G., A.S. Rand & D.M. Windsor. 1990. *Ecología de un bosque tropical*. Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa, Panamá.
- Leopold, A. 1920. The forestry of the prophets. *Journal of Forestry* 18(4): 412-419.
- Lévêque, C. & J.C. Mounolou 2003. *Biodiversity*. John Wiley, Nueva York, NY, EUA.
- Levin, S. 2000. Multiple scales and the maintenance of biodiversity. *Ecosystems* 3: 498-506.
- Levin, S.A. & R.T. Paine. 1974. Disturbance, Patch Formation, and Community Structure. *PNAS* 71:2744-2747.
- Likens, G.E. & F.H. Bormann. 1995. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Likens, G.E. 1998. Limitations to intellectual progress in ecosystem science. En: Pace, M.L. & P.M. Groffman (Eds.). *Successes, limitations, and frontiers in Ecosystem Science*. Springer Verlag, Nueva York NY, EUA.
- Likens, G.E., F.H. Bormann, N.M. Johnson, D.W. Fisher & R.S. Pierce. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecological Monographs* 40: 23-47.
- Limburg, K. E., R. V. O'Neill, R. Costanza, & S. Farber. 2002. Complex systems and valuation. *Ecological Economics* 41: 409-420.
- Lindeman, R.L. 1942. The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology* 23: 399-418.
- Lindenmayer D. & J. Fischer. 2006. *Habitat fragmentation and landscape change*. Island Press. Washington, DC, EUA.
- Lindenmayer, D.B. & G.E. Likens. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation* 143: 1317-1328.
- Liot, C. & O. Grünberger, 2005. Las Salinas de Carrillo: un ejido de producción de sal continental en el desierto Chihuahuense. En: Grünberger O., V.M. Reyes Gómez & J.L. Janeau (Eds.). *Las Playas del Desierto Chihuahuense (Parte Mexicana), influencia de las sales en medio ambiente árido y semi-árido*. IRD- Inecol. Xalapa, Veracruz, México. Pp.
- Liu, K. B. 2004. Paleotempestology: principles, methods, and examples from the Gulf of Mexico coast lake sediments. En: Murnane R. J. & K. B.

- Liu (Eds.). *Hurricane and Typhoon: past, present, and future*. Columbia University Press, Nueva York, NY, EUA. Pp. 13-57.
- Liu, K. B. 2007. Uncovering prehistoric hurricane activity - Examination of the geological record reveals some surprising long-term trends. *American Scientist* 95: 126-133.
- Liverman, D. & K. O'Brien. 1991. Global warming and climate change in Mexico. *Climate Change* 11: 351-364.
- Llamas-Casillas, P. 2009. Sucesión ecológica en bosques de pino-encino afectados por incendios severos en la Sierra de Manantlán. Tesis. Ingeniería en Recursos Naturales y Agropecuarios. Universidad de Guadalajara-CUCSur. Autlán, Jalisco, México.
- Lombard, A., A. Cazenave, K. DoMinh, C. Cabanes, & R. S. Nerem. 2005. Thermosteric sea level rise for the past 50 years; comparison with tide gauges and inference on water mass contribution. *Global and Planetary Change* 48: 303-312.
- Lomelí, D. Z., T. S. Vazquez, J. L. R. Galaviz, A. Yañez-Arancibia, & E. R. Arriaga. 1999. Terms of reference towards an integrated management policy in the coastal zone of the Gulf of Mexico and the Caribbean. *Ocean & Coastal Management* 42: 345-368.
- Long, S.P., M.B. Jones & M.J. Roberts, (Eds). 1992. *Primary Productivity of Grass Ecosystems of the Tropics and Sub-tropics*. Chapman-Hall, Londres, Reino Unido.
- López, A. 1992. Escorrentía en pequeñas cuencas hidrológicas con selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. Tesis de Licenciatura. ENEP-Iztacala, UNAM, México, DF.
- López-Pérez, R.A. & A.F. Budd. 2009. Coral diversification in the Gulf of California during Late Miocene to Pleistocene. Pp. 58-71. En: Johnson M.E & Ledesma-Vasquez (Eds). *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California: Past and Present*. University of Arizona Press. Tucson, Arizona, EUA.
- López-Pérez, R.A. & L.M. Hernández-Ballesteros. 2004. Coral community structure and dynamics in the Huatulco area, Western Mexico. *Bulletin of Marine Science* 75: 453-472.
- López-Pérez, R.A. & A. López-García. 2008. Identificación de sitios prioritarios para la conservación de corales formadores de arrecife en el estado de Oaxaca. *Hidrobiológica* 18(3):209-213.
- López-Pérez, R.A., Mora-Pérez, M.G. & G.E. Leyte-Morales. 2007. Coral (Anthozoa: Scleractinia) recruitment at Bahías de Huatulco, western México: Implications for coral community structure and dynamics. *Pacific Science* 61(3):355-369.
- López-Pérez, R.A., I. Lopez Perez Maldonado, A.M. Lopez-Ortiz, L.M. Barranco-Servin, J. Barrientos-Villalobos & G.E. Leyte-Morales. 2010. Reef fishes of the Mazunte-Bahías de Huatulco reef track, Oaxaca, Mexican Pacific. *Zootaxa* 2422:53-62.
- López-Rosas, H. 2007. Respuesta de un humedal transformado por la invasión de la gramínea exótica *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitchc. & A. Chase a los disturbios inducidos (cambios en el hidropериodo, apertura de espacios y modificación de la intensidad lumínica). Tesis de Doctorado. Posgrado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Instituto de Ecología A.C., Xalapa. Veracruz, México.
- López-Rosas, H., P. Moreno-Casasola & I. Mendelssohn. 2005. Effects of an African grass invasion on vegetation, soil and interstitial water characteristics in a tropical freshwater marsh in La Mancha, Veracruz (Mexico). *Journal of Plant Interactions* 1(3):187-195.
- Lot -Helgueras, A. 1976. La Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas: pasado, presente y futuro. En: Gomez-Pompa, A., C. Vázquez-Yanes, S. Del Amo Rodríguez & A. Butanda Cervera (Eds). 1976. *Investigaciones sobre la Regeneración de Selvas Altas en Veracruz, México*. Compañía Editora Continental, México, DF, México. Pp. 31-69.
- Lubchenco, J. 1998. Entering the century of the environment: A new social contract for science. *Science* 279: 491-497.
- Lubchenco, J., A.M. Olson, L.B. Brubaker, S.R. Carpenter, M.M. Holland, S.P. Hubbell, S.A. Levin, J.A. MacMahon, P.A. Matson, J.M. Melillo, H.A. Mooney, C.H. Peterson, H.R. Pulliam, L.A. Real, P.J. Regal & P.G. Risser. 1991. The Sustainable Biosphere Initiative: An ecological research agenda. *Ecology* 72 (2): 371-412.
- Lucano-Ramírez, G., S. Ruiz-Ramírez, B. Aguilar-Palomino & J.A. Rojo-Vázquez. 2001. Listado de las especies de peces de la región costera de Jalisco y Colima, México. *Ciencia y Mar* 5(15): 13-20.
- Ludwig, D., R. Hilborn, & C. Walters. 1993. Uncertainty, Resource Exploitation, and Conservation - Lessons from History. *Science* 260: 17-1993.
- Lugo, A.E. 1986. Water and the ecosystems of the Luquillo Experimental Forest. *General Technical Report S0-63*, US Department of Agriculture, Forest Service. Southern Forest Experiment

- Station. Institute of Tropical Forestry, Río Piedras, Puerto Rico.
- Lugo, A.E. 2000. Effects and outcomes of Caribbean hurricanes in a climate change scenario. *Science of the Total Environment* 262:243-251.
- Lugo, A.E., C. Rogers, & S. Nixon. 2000. Hurricanes, coral reefs and rainforests: Resistance, ruin and recovery in the Caribbean. *Ambio* 29: 106-114.
- Lugo, A., González, M.E., Sánchez, M. del R. & Alcocer, J. 1999. Distribution of *Leptodiaptomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoidea) in a Mexican hyposaline lake. *Revista de Biología Tropical* 17: 145-152.
- Lugo, A., J. Alcocer, M.R. Sánchez, E. Escobar & M. Macek. 2000. Temporal and spatial variation of bacterioplankton abundance in a tropical, warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 27: 2968-2971.
- Lull, H.W. (Ed.) *Forest hidrology*. Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.
- Lyons, J. & S. Navarro-Pérez. 1990. Fishes of the Sierra de Manantlan, West-Central Mexico. *Southwestern Naturalist* 35(1): 32-46.
- Maass, J. M. 1992. Soil erosion and conservation experiments in Mexico. En: H. Hurni & K. Tato (Eds.) *Erosion, conservation and small-scale farming*. Geographica Bernesia, International Soil Conservation Organization (ISCO) and World Assessment of Soil and Water Conservation (WASWC). Pp. 383-391.
- Maass, M. 1995. Conversion of tropical dry forest to pasture and agriculture. En: S.H. Bullock, H.A. Mooney & E. Medina (Eds.) *Seasonally dry tropical forests*. Cambridge University Press. Londres, Reino Unido. 399-422 Pp.
- Maass M. & M. Equihua. 2008. Red mexicana de investigación ecológica a largo plazo. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215:16-17.
- Maass, J. M., C.F. Jordan & J. Sarukhán. 1988. Soil erosion and nutrient losses in seasonal tropical agroecosystems under various management techniques. *Journal of Applied Ecology* 25: 595-607.
- Maass, J.M., V. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva & J. Sarukhán. 1994. The Chamela watershed project. Centro de Ecología, UNAM, México, DF.
- Maass, J.M., J.M. Vose, W.T. Swank, & A. Martínez-Yrizar. 1995. Seasonal changes of leaf area index (LAI) in a tropical deciduous forest in west Mexico. *Forest Ecology and Management* 74: 171-180.
- Maass, J.M., V. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva, A. Pérez-Jiménez & J. Sarukhán. 2002a. Aspectos funcionales del ecosistema de selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. En: F.A. Noguera, J.H. Vega, A.N. García-Aldrete & M. Quesada (Eds.) *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México, DF. Pp. 525-542.
- Maass, J.M., A. Martínez-Yrizar, C. Patiño & J. Sarukhán 2002b. Distribution and annual net accumulation of above-ground dead phytomass and its influence on throughfall quality in a Mexican tropical deciduous forest ecosystem. *Journal of Tropical Ecology* 18: 1-15.
- Maass, J., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García-Oliva, A. Martínez-Yrizar, H. Cotler, J. López-Blanco, A. Pérez-Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala, & J. Sarukhán. 2005. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. *Ecology and Society* 10(1): 17. En línea: <http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/art17/>
- Maass, J.M., Jardel, E.J., Martínez-Yrizar, A., Calderón-Aguilera, L.E., Herrera, J., Castillo, A., Euán-Ávila, J., Equihua, M. 2010. Las áreas naturales protegidas y la investigación ecológica de largo plazo en México. *Ecosistemas* 19(2), [en línea: <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=643>].
- MacArthur, R.H. & E.O. Wilson. 1967. *The theory of Island Biogeography*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Magaña, M.A. 2003. Actitudes & percepciones de productores rurales y sus familias hacia la conservación de la selva y el área natural protegida: Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala, Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Magnuson, J. J. 1990. Long term ecological research and the invisible present. *Bioscience*, 40 (7): 502-508.
- Magurran, A.E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell, Oxford, Reino Unido.
- Mander, U., A. Kull & V. Kuusemets. 2000. Nutrient flows and land use change in a rural catchment: a modeling approach. *Landscape Ecology* 15: 187-199
- Mann, C.C. 2005. *1491, New revelations of the Americas before Columbus*. Alfred A. Knopf. Nueva York, NY, EUA.

- Mann, K.H. & J.R.N. Lazier (Eds.) 2000. *Dynamics of marine ecosystems*. Blackwell Science. Malden, Massachusetts, EUA.
- Manson, R.H., E.J. Jardel P., M. Jiménez-Espinoza & C.A. Escalante-Sandoval. 2009. Perturbaciones y desastres naturales: impacto sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. En: R. Dirzo, R. González & I.J. March (Compiladores) *Capital Natural de México*. Vol. II. *Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México. Pp. 131-184.
- Marsh, G.P. 1864. *Man and nature; or, Physical Geography as modified by human action*. Charles Scribner. Nueva York, NY, EUA.
- Martínez, L. 2003. Percepciones sociales sobre los servicios ecosistémicos en dos comunidades aledañas a la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala, Jalisco. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Martínez-Alier J. & J. Roca. 2001. *Economía ecológica y política ambiental*. Fondo de Cultura Económica. México, DF, México.
- Martínez-Alier, J. 1992. *De la economía ecológica al ecologismo popular*. Icaria. Barcelona, España.
- Martínez-Ochoa, G., 2007. Efecto de la intensidad de lluvia sobre la producción de escurrimiento y erosión en la Microcuenca el General, Mapimí, Durango. Tesis de Licenciatura en Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México.
- Martínez-Ramos, M. 1994. Regeneración natural y diversidad de especies arbóreas en selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*. 54, 179-224.
- Martínez-Ramos, M. 1994. Estudios y perspectivas sobre ecología vegetal en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 55: 75-104.
- Martínez-Ramos, M. 2004. Proyecto Bases científicas para el manejo de bosques tropicales. Propuesta de Investigación. Financiada por Fondos Sectoriales Semarnat-Conacyt. México, DF.
- Martínez-Ramos, M. L., R. H. Manson, P. Balvanera, R. Dirzo, J. Soberon, L. García-Barrios, M. Martínez-Ramos, P. Moreno-Casasola, L. Rosenzweig & J. Sarukhán. 2006. The evolution of ecology in Mexico: facing challenges and preparing for the future. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 259-267.
- Martínez-Rivera, L.M., A. Carranza & M. García. 2000. Aquatic ecosystem pollution of the Ayuquila River, Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, México. En: M. Munawar, S.G. Lawrence, I.F. Munawar & D.F. Malley (Eds.). *Aquatic Ecosystems of Mexico: Status and Scope*. Ecosystem World Monograph Series. Backhuys Publishers, Leiden, Países Bajos. Pp. 165-181.
- Martínez-Yrizar, A. 1980. Tasas de descomposición de materia orgánica foliar de especies arbóreas de selvas en clima estacional. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, DF.
- Martínez-Yrizar, A., J. Sarukhán, A. Pérez-Jiménez, E. Rincón, J. M. Maass, A. Solís-Magallanes & L. Cervantes. 1992. Above-ground phytomass of a tropical deciduous forest on the coast of Jalisco, México. *Journal of Tropical Ecology* 8: 87-96.
- Martínez-Yrizar, A., J.M. Mass, L.A. Pérez-Jiménez, & J. Sarukhán. 1996. Net primary productivity of a tropical deciduous forest ecosystem in western Mexico. *Journal of Tropical Ecology* 12: 169-175.
- Masera, O., M.J. Ordoñez, R. Dirzo 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Masters, P.M. 2006. Holocene sand beaches of Southern California: ENSO forcing and coastal processes on millennial time scales. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 232(1): 73-95.
- Mather, A.S. 1999. Land use and cover change. *Land Use Policy* 16: 143.
- May, J.D. 1999. Spatial variation in litter production by the mangrove *Avicennia marina* var. *australasica* in Rangaunu Harbour, Northland, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 33: 163-172.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White. 2001. *Climate change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- McDonnell, M.J. & S.T.A. Pickett (Eds.). 1993. *Humans as Components of Ecosystems*. Springer Verlag. Nueva York, NY, EUA.
- McGuire, A.D., J.M. Melillo, L.A. Joyce, D.W. Kicklighter, A.L. Grace, B. Moore III, & C.J. Vorosmarty. 1992. Interactions between carbon and nitrogen dynamics in estimating net primary productivity for potential vegetation in North America. *Global Biogeochemical Cycles* 6: 101-124.
- McGuire, A.D., L.A. Joyce, D.W. Kicklighter, J.M. Melillo, G. Esser, & C.J. Vorosmarty. 1993.

- Productivity response of climax temperate forests to elevated temperature and carbon dioxide - a North American comparison between two global models. *Climatic Change* 24: 287-310.
- McGuire, T. 2006. Louisiana's oysters, America's wetlands, and the storms of 2005. *American Anthropologist* 108: 692-705.
- McNeill, J. R. 2000. *Something new under the Sun. An environmental history of the twentieth century World*. W.W. Norton & Company, Nueva York, NY, EUA.
- Medina-Gómez, I. & J. A. Herrera-Silveira. 2003. Spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: a multivariate approach. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 58:455-465.
- Medina-Gómez, I. & J. A. Herrera-Silveira. 2006. Primary production dynamics in a pristine groundwater influenced coastal lagoon of the Yucatan Peninsula. *Continental Shelf Research* 26:971-986.
- Melillo, J.M., A.D. McGuire, D.W. Kicklighter, B. Moore, C.J. Vorosmarty & A.L. Schloss. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* 363: 234-240.
- Meraz, J.J., F. Dickinson, A. Castillo, J. Sosa & M. Maass. 2007. *Agenda socioambiental para la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo*. Red MEX-LTER, México, DF, México. Reporte no publicado.
- Meyerson, L. A., J. Baron, J. M. Melillo, R. J. Naiman, R. I. O'Malley, G. Orians, M. A. Palmer, A. S. P. Pfaff, S. W. Running & O. E. Sala. 2005. Aggregate measures of ecosystem services: can we take the pulse of nature? *Frontiers in Ecology* 3: 56-59.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC, EUA.
- Miller, P.M. & J.B. Kauffman 1998. Effects of slash and burn agriculture on species abundance and composition of a tropical deciduous forest. *Forest Ecology and Management* 103: 191-201.
- Miranda, A. 2008. Deforestación y fragmentación del hábitat: consecuencias ecológicas sobre la fauna de mamíferos del bosque tropical seco en el Occidente de México. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM, México, DF.
- Mitsch, W. J. 2005. Applying science to conservation and restoration of the world's wetlands. *Water Science and Technology* 51: 13-26.
- Mitsch, W. J., & J. G. Gosselink. 2000. *Wetlands*, 3 Ed. John Wiley & Sons, Nueva York, NY, EUA.
- Mitsch, W. J., & J. W. Day. 2004. Thinking big with whole-ecosystem studies and ecosystem restoration - a legacy of H.T. Odum. *Ecological Modelling*. 178: 133-155.
- Mitsch, W. J., & J. W. Day. 2006. Restoration of wetlands in the Mississippi-Ohio-Missouri (MOM) River Basin: Experience and needed research. *Ecological Engineering* 26: 55-69.
- Mittermeier, R.A., P. Robles-Gil & C.G. Mittermeier. 1997. *Megadiversidad: Los países biológicamente más ricos del mundo*. Cemex, México, DF, México.
- Mooney, H.A. & M. Godron (Eds.). 1983. *Disturbance and ecosystems*. Springer Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Montaña, C. (Ed.) *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. México, DF, México.
- Montaña, C. & R.F. Breimer. 1998. Major vegetation and environment units. En Montaña C. (ed.). *Estudio integrado de los recursos vegetación, suelo, y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí*. Instituto de Ecología, AC. México, DF. Pp. 77-97.
- Moreno, C.E. 2001. *Métodos para medir la biodiversidad*. Manuales y Tesis SEA (Sociedad Entomológica Aragonesa). Vol. 1. Zaragoza, España.
- Moreno, E. 1998. Variación espacial y temporal de la conductancia estomática y del potencial hídrico foliar de una selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- Moreno-Casasola, P. (Ed.). 2006. *Entornos veracruzanos: la costa de la Mancha*. Instituto de Ecología, AC, Xalapa, Veracruz, México.
- Morfín-Ríos, J.E. 2011. Propiedades físicas de combustibles forestales en bosques de *Pinus douglasiana* de la Sierra de Manantlán. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México. Morelia, Michoacán, México.
- Morfín-Ríos, J.E., E.J. Jardel, J.M. Michel-Fuentes & E. Alvarado. 2006. *Manual para la evaluación y cuantificación de combustibles forestales*. Universidad de Guadalajara-Universidad de Washington. Autlán, Jalisco, México.
- Mueller-Dumbois, D., & H. Ellenberg. 1974. *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. John Wiley, Nueva York, NY, EUA.
- Muller-Karger, F. E., R. Varela, R. Thunell, R. Luerssen, C. M. Hu & J. J. Walsh. 2005. The im-

- portance of continental margins in the global carbon cycle. *Geophysical Research Letters* 32, L01602, doi: 10.1029/2004GL021346.
- Munasinghe M & Swart R. 2005. *Primer on climate change and sustainable development*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Murcia, C. 1995. Edge effect in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution* 10 (2): 58-62.
- Murdiyarso, D. & U.R. Warsin. 1995. Estimating land use change and carbon release from tropical forests conversion using remote sensing technique. *Journal of Biogeography* 22: 715-721.
- Murphy, P.G. & A.E. Lugo. 1986. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review Ecology and Systematics* 17: 67-88.
- Myers, R.L. 2006. *Living with fire: sustaining ecosystems and livelihoods through integrated fire management*. The Nature Conservancy, Tallahassee, Florida.
- Nakashizuka, T. & Y. Matsumoto (Eds.). 2002. *Diversity and Interaction in a Temperate Forest Community Ogawa Forest Reserve of Japan*. Springer Verlag. Nueva York, NY, EUA.
- Nason, J.D., P.R. Aldrich & J.L. Hamrick. 1997. Dispersal and the dynamics of genetic structure in fragmented tropical tree populations. Pp: 304-320. In: W.F. Laurance and R.O. Bierregaard, Jr. (eds.). *Tropical Forest Remnants. Ecology, Management and Conservation of Fragmented Communities*. Chicago: University of Chicago Press.
- Naveh, Z. & A.S. Lieberman. 1990. *Landscape ecology; Theory and Application*. Springer Verlag. Nueva York, NY, EUA.
- Neill, P. 2001. Is it the time to bury the ecosystem concept? (With full military honors, of course!) *Ecology* 82: 3275-3284.
- Nerem, R. S. 1997. Global mean sea level change: Correction. *Science* 275:1053-1053.
- Nerem, R. S. 1999. Measuring very low frequency sea level variations using satellite altimeter data. *Global and Planetary Change* 20:157-171.
- Nerem, R. S., E. Leuliette, & A. Cazenave. 2006. Present-day sea-level change: A review. *Comptes Rendus Geoscience* 338: 1077-1083.
- Newbould, P. J. 1967. *Methods for Estimating the Primary Production of Forests*. IBP Handbook No. 2. Blackwell, Oxford, Reino Unido.
- Newcombe, K., Kalma, J. & Aston, A. 1978. The metabolism of a city: the case of Hong Kong. *Ambio* 7: 3-15.
- Noguera, F., J. Vega Rivera, A. García Alderete & M. Quesada. 2002. *Historia Natural de Chamela*, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF, México.
- Núñez, D., C. Muñoz, H. Gadsden, V.M. Reyes-Gómez, 2006. Caractérisation, a diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'état de Chihuahua, au Mexique. *Science et Changements Planétaires - Sécheresse* 17(4) :457-465.
- Oliva, M.G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta & M.R. Sánchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306.
- Oliva, M.G., A. Lugo, J. Alcocer & E.A. Cantoral-Uriza. 2006. *Cyclotella alchichicana* sp. nov. from a saline Mexican lake. *Diatom Research* 21(1): 81-89.
- O'Neill, R.V. 1989. Perspectives in hierarchy and scale. En: Roughgarden, J., R.M. May & S.A. Levin. *Perspectives in ecological theory*. Princeton University Press, Princeton Nueva Jersey, EUA. Pp. 140-146.
- O'Neill, R.V., D.L. De Angelis, J.B. Waide & T.F.H. Allen. 1986. *A hierarchical concept of ecosystems*. Princeton University Press. Princeton Nueva Jersey, Estados Unidos.
- Odum, E.P. & F.O. Sarmiento. 1998. *Ecología. El puente entre ciencia y sociedad*. McGraw-Hill Interamericana, México, DF, México.
- Odum, E. P. 1959. *Fundamentals of ecology*. W. B. Saunders, Philadelphia, EUA.
- Odum, H.T. 1980. *Ambiente, energía y sociedad*. Blume. Barcelona, España.
- O'Hara, S.L., F.A. Street-Perrot & T.P. Burt. 1993. Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture. *Nature* 362: 48-51.
- Ojima, D.S., W.J. Parton, D.S. Schimel, T.G.F. Kittel & J.M.O. Scurlock. 1993. Modeling the effects of climatic and CO₂ changes on grassland storage of soil. *Water, Air, and Soil Pollution* 70: 643-657.
- Oliver, C.D. & B.C. Larson. 1990. *Forest stand dynamics*. McGraw Hill, Nueva York, NY, EUA.
- Olson, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* (44) 2: 322-331.
- Oosterhoorn, M. & M. Kappelle. 2000. Vegetation structure and composition along an interior-edge-exterior gradient in a Costa Rican montane cloud forest. *Forest Ecology and Management* 126: 291-307.
- Oreskes, N., K. Shrader-Frechette, & K. Belitz. 1994. Verification, validation, and confirmation of

- numerical models in the earth sciences. *Science* 263:641-646.
- Orlove, B.S. 1980. Ecological anthropology. *Annual Review of Anthropology* 9:235-273.
- Ortega-Huerta, M. A. & T. A. Peterson. 2004. Modelling spatial patterns of biodiversity for conservation prioritization in North-eastern México. *Diversity and Distributions* 10: 39-54.
- Ostertag, R., W. L. Silver, & A. E. Lugo. 2005. Factors affecting mortality and resistance to damage following hurricanes in a rehabilitated subtropical moist forest. *Biotropica* 37: 16-24.
- Ostfeld, R.S., S.T.A. Pickett, M. Shachack & G.E. Likens. 1997. Defining the scientific issues. En S.T.A. Pickett, R.S. Ostfeld, M. Shachack & G.E. Likens (eds.), *The ecological basis of conservation*. Chapman & Hall, Nueva York, EUA. Pp. 3-10.
- Ostrom, E. 1990. *Governing the commons. The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Pace, M.L. & P.M. Groffman (Eds.). 1998. *Success, limitations, and frontiers in ecosystem science*. Springer Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Palmer, M. A., E. S. Bernhardt, E. A. Chornesky, S. L. Collins, A. P. Dobson, C. S. Duke, B. D. Gold, R. B. Jacobson, S. E. Kingsland, R. H. Kranz, M. J. Mappin, M. L. Martínez, F. Micheli, J. L. Morse, M. L. Pace, M. Pascual, S. S. Palumbi, O. Reichman, A. R. Townsend, & M. G. Turner. 2005. Ecological science and sustainability for the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3: 4-11.
- Palmer, M.A., R.F. Ambrose, & N.L. Poff. 1997. Ecological theory and community restoration ecology. *Restoration Ecology* 5:291-300.
- Palmer, M., E. Bernhardt, I. Chornesky, S. Collins, A. Dobson, C. Duke, B. Gold, R. Jacobson, S. Kingsland, R. Kranz, M. Mappin, M.L. Martínez, F. Micheli, J. Morse, M. Pace, M. Pascual, S. Palumbi, O.J. Reichman, A. Simons, A. Townsend, & M. Turner. 2004. Ecology for a Crowded Planet. *Science* 304: 1251-1252.
- Parker, G., C. Tinoco-Ojanguren, A. Martinez-Yrizar & J.M. Maass. 2005. Seasonal balance and vertical pattern of photosynthetically active radiation in canopies along an elevation gradient in a tropical dry deciduous forest ecosystem. *Journal of Tropical Ecology* 21: 283-295.
- Parmesan, C. & G. Yohe. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature* 421: 37-42.
- Parr, T. 2010. Red Internacional de Investigación Ecológica a Largo Plazo: alcances y direcciones futuras en Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 13-16.
- Parton, W.J., D.S. Schimel & D.S. Ojima. 1994. Environmental change in grasslands: assessment using models. *Climatic Change* 28: 111-141.
- Paz García, D., F. Correa Sandoval, H.E. Chávez Romo, H. Reyes Bonilla, R.A. López Pérez, P. Medina Rosas & M.P. Hernández Cortés. 2009. Genetic structure of the massive coral *Porites panamensis* (Anthozoa: Scleractinia) from the Mexican Pacific. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale 1: 449-453.
- Perales, H.R., & J.R. Aguirre. 2009. Biodiversidad humanizada. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, vol. 1: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México. Pp. 565-603
- Peralta, L.A. 2007. Diseño de un índice de integridad biótica para los lagos interduñarios de la región costera central del estado de Veracruz, México. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ecología y Manejo de Recursos Naturales. Instituto de Ecología, AC, Xalapa. Veracruz, México.
- Peralta, L., J. Alcocer, E. Escobar & A. Lugo. 2002. Oligochaetes from six tropical crater lakes in Central Mexico: Community composition, species density and biomass. *Hydrobiologia* 467: 109-116.
- Peterson, D.L. & R.H. Waring. 1994. Overview of the Oregon transect ecosystem research project. *Ecological Applications* 4: 211-225.
- Petterson, J. S., L. D. Stanley, E. Glazier, & J. Philipp. 2006. A preliminary assessment of social and economic impacts associated with hurricane Katrina. *American Anthropologist* 108: 643-670.
- Pianka, E.R. 1974. *Evolutionary ecology*. Harper & Row, Nueva York, NY, EUA.
- Pickett, S.T.A. & R.S. Ostfeld. 1995. The shifting paradigm in ecology. En: Knight, R.L. & S.F. Bates. *A new century for natural resources management*. Island Press, Washington DC, EUA. Pp. 261-278.
- Pickett, S. T. A., & M. L. Cadenasso. 2002. The ecosystem as a multidimensional concept: Meaning, model, and metaphor. *Ecosystems* 5:1-10.
- Pickett, S.T.A. & P.S. White (Eds.). 1985. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press. Nueva York, NY, EUA.
- Pickett, S. T. A., M. L. Cadenasso, & J. M. Grove. 2004. Resilient cities: meaning, models, and metaphor

- for integrating the ecological, socio-economic, and planning realms. *Landscape and Urban Planning* 69:369-384.
- Pickett, S.T.A., R.S. Ostfeld, M. Shachack & G.E. Likens (eds.). 1997. *The ecological basis of conservation*. Springer, Nueva York, EUA.
- Pimentel, D. 1984. Energy flow in agroecosystems. En: Lowrance R., B.R. Stinner & G.J. House (Eds.). *Agricultural Ecosystems: Unifying Concepts*. John Wiley & Sons, Nueva York, NY, EUA. Pp. 121-132.
- Pragasam, L.A. & N. Parthasarathy. 2005. Litter production in tropical dry evergreen forests of south India in relation to season, plant life-forms and physiognomic groups. *Current Science* 88(8): 1255-1263.
- Psuty, N.P., M.L. Martínez, J. López-Portillo, T.M. Silveira, J.G. García-Franco & N.A. Rodríguez. Interaction of alongshore sediment transport and habitat conditions at Laguna La Mancha, Veracruz, Mexico. *Journal of Coastal Conservation and Management* (en revision).
- Pugh, D. 2004. *Changing sea levels*. Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, EUA.
- Pujadas, A. 2003. Comunicación y participación social en el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la costa de Jalisco y la Reserva de la Biosfera Chamela-Cuixmala. Tesis de Maestría Posgrado en Ciencias Biológicas UNAM, México, DF.
- Pyne, S.J., P.L. Andrews & R.D. Laven. 1996. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Rabalais, N. N., R.E. Turner, & W.J. Wiseman. 2001. Hypoxia in the Gulf of Mexico. *Journal of Environmental Quality* 30: 320-329.
- Ralph, C.J., G.R. Geupel, P. Pyle, T.E. Martin, D.F. DeSante & B. Milá. 1996. Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Reporte técnico. PSW-GTR-159. Pacific Southwest Research Forest Service, US Department of Agriculture, Albany, California, EUA.
- Ramamoorthy, T.P., B. Robert, A. Lot & J. Fa (Eds.). 1998. *Diversidad biológica de México orígenes y distribución*. Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF, México.
- Reaser, J.K., R. Pomerance & P.O. Thomas. 2000. Coral bleaching and global climate change: scientific findings and political recommendations. *Conservation Biology* 14: 1500-1511.
- Redman, C.L., J.M. Grove & L.H. Kuby. 2004. Integrating social science into the long-term ecological research (LTER) network: social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems* 7: 161-171.
- Reice, S.R. 2001. *The silver lining: the benefits of natural disasters*. Princeton University Press. Princeton, Nueva Jersey, EUA.
- Rentería, L.Y., V.J. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar & Pérez-Jiménez, A. 2005. Nitrogen and phosphorus resorption in trees of a Mexican tropical dry forest. *Trees Structure and Function* 19: 431-441.
- Reyes Bonilla, H. 1993. Biogeografía y ecología de los corales hermatípicos (Anthozoa: Scleractinia) del Pacífico de México. En: S.I. Salazar Vallejo & N.E. González (Eds.). *Biodiversidad marina y costera de México*. Conabio/CIQRO, Chetumal, Quintana Roo, México. Pp. 207-222.
- Reyes-Bonilla, H. 2001. Effects of the 1997-98 El Niño-Southern Oscillation on coral communities of the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Sciences* 69: 251-266.
- Reyes-Bonilla, H & L.E. Calderón-Aguilera. 1994. Parámetros poblacionales de *Porites panamensis* Verrill (Anthozoa: Scleractinia), en el arrecife de Cabo Pulmo, México. *Revista Biología Tropical* 42(1/2): 121-128.
- Reyes-Bonilla, H. & J.D. Carriquiry. 1994. Range extension of *Psammocora superficialis* (Scleractinia: Thamnasteriidae) to Isla Socorro, Revillagigedo Archipelago, Colima, Mexico. *Revista de Biología Tropical* 42: 383-384.
- Reyes-Bonilla, H. & L.E. Calderón-Aguilera. 1999. Population density, distribution and consumption rates of three corallivores at Cabo Pulmo Reef, Gulf of California, Mexico. *Marine Ecology*, 20 (3-4):347-357.
- Reyes-Bonilla, H. & L. Álvarez-Filip. 2009. Long-term changes in taxonomic distinctness and trophic level of reef fishes at Cabo Pulmo reef, Gulf of California. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Fort Lauderdale 1: 790-794.
- Reyes-Bonilla, H. & R.E. López-Pérez. 2009. Corals and coral reef communities in the Gulf of California. pp. 43-55. En: M. Johnson & J. Ledezma (Eds.). *Atlas of marine ecosystems in the western Gulf of California*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, EUA.
- Reyes-Bonilla, H., L.E. Calderón-Aguilera, G. Cruz-Piñon, P. Medina-Rosas, R.A. López-Pérez, M.D. Herrero-Pérezrul, G. E. Leyte-Morales, A. L. Cupul-Magaña & J.D. Carriquiry-Beltrán. 2005. *Atlas de los corales pétreos (Anthozoa: scleractinia) del Pacífico Mexicano*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Universidad de Guadalajara / Centro Universitario de la Costa, Universidad del Mar, Ensenada.
- Reyes-Bonilla, H., J.D. Carriquiry, G.E. Leyte-Morales & A. Cupul-Magaña. 2002. Effect of the El Niño- Southern Oscillation and the Anti- El Niño events (1997-1999) on coral reefs of the western coast of México. *Coral Reefs* 21: 368-372.
- Reyes-Bonilla, H., J.D. Carriquiry, G.E. Leyte-Morales & A. Cupul-Magaña. 2002. Effect of the El Niño- Southern Oscillation and the Anti- El Niño events (1997-1999) on coral reefs of the western coast of México. *Coral Reefs* 21: 368-372.
- Reyes-Bonilla, H., L.E. Calderón-Aguilera, G. Cruz-Piñón, R.A. López-Pérez & P. Medina-Rosas. 2010. Evaluación de la diversidad gama de corales arrecifales (Scleractinia) del Pacífico de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 113-121.
- Reyes-Gómez, V.M., 1995. Caracterización hidrodinámica de algunos suelos del norte árido de México. *Terra* 13(2): 87-97.
- Reyes-Gómez, V.M., O. Grünberger, J.L. Janeau, 1996. Hidrodinámica en el suelo de un pastizal en una zona árida del norte de México. *Terra* 14(2): 129-136.
- Reyes-Gómez, V.M., D. Núñez-López, C. A. Muñoz-Robles, H. Gadsden, J.A. Rodríguez, M.A. López, O.R. Hinojosa, 2006. Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant Rio Conchos, Chihuahua, Mexique. *Science et Changements Planétaires - Sécheresse*. 17(4) : 475-484.
- Reynolds, J.D., G.M. Mace, K.H. Redford & J.G. Robinson. 2001. *Conservation of exploited species*. Cambridge University Press. Nueva York, NY, EUA.
- Richards, K.R., & C. Stokes. 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: A dozen years of research. *Climatic Change* 63: 1-48.
- Ricker M., G. Gutiérrez-García & D. Daly. 2007. Modeling long-term tree growth curves in response to warming climate: test cases from a subtropical mountain forest and a tropical rainforest in Mexico. *Canadian Journal of Forestry Research* 37: 977-989.
- Ricker, W.F. 1963. Big effects from small causes: two examples from fish population dynamics. *Journal of Fisheries Resources Board of Canada* 20: 257-264.
- Ricklefs, R.E. & G.L. Miller. 2000. *Ecology*. W.H. Freeman. Nueva York, NY, EUA.
- Rioja-Paradela, T.M., L.M. Scott-Morales, M. Cotera-Correa & E. Estrada-Castillón. 2008. Reproduction and behavior of the Mexican prairie dog (*Cynomys mexicanus*). *The Southwestern Naturalist* 53 (4): 520-523. Scott-Morales, L.E. Estrada, F. Chávez-Ramírez & M. Cotera 2004. Continued decline in geographic distribution and population density of the Mexican Prairie Dog (*Cynomys mexicanus*). *Journal of Mammalogy* 85 (6).
- Rivera-Arriaga, E., & G. Villalobos. 2001. The coast of Mexico: approaches for its management. *Ocean & Coastal Management* 44:729-756.
- Rivera-Cervante, L.E. & G. Halffter. 1999. Monografía de las especies mexicanas de Cantón del subgénero Glaphyrocanton (Coleoptera: Sacarabidae: Sacarabaeinae). *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.) 77: 23-150.
- Rivera-Cervantes, L.E. & E. García-Real. 1998. Análisis preliminar sobre la composición de escarabajos necrófilos (Coleoptera: Silphidae y Scarabeidae) presentes en dos bosques de pino (uno dañado por fuego) en la Estación Científica Las Joyas, Sierra de Manantlán, México. *Duguesiana* 5(1): 11-22.
- Rivera-Guzmán, N. 2008. Variación espacio temporal de los parámetros físico-químicos, biológicos y de la distribución de los pastos marinos en la Laguna La Mancha. Maestría en Ecología y Manejo de Recursos. Instituto de Ecología, AC, Xalapa. Veracruz, México.
- Rivera-Monroy, V. H., R. R. Twilley, D. Bone, D. L. Childers, C. Coronado-Molina, I.C. Feller, J. Herrera-Silveira, R. Jaffe, E. Mancera, E. Rejmankova, J.E. Salisbury & E. Weil. 2004. A conceptual framework to develop long-term ecological research and management objectives in the wider Caribbean region. *Bioscience* 54: 843-856.
- Rivera-Monroy, V.H., M. Mass, J. Benítez, C. Coronado, J. Euan, E. Godínez, H. González, J. Herrera, L. Martínez, N. Mercado-Silva, M. Pérez, V. Reyes, E. Rodríguez & D. Valdés. 2008. Eco-hidrología y demandas de agua en México. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215: 24-29.
- Robbins, P. 2004. *Political ecology*. Blackwell, Oxford, Reino Unido.
- Robinson, J.A. & D.A. Thomson. 1992. Status of the Pulmo coral reefs in the lower Gulf of California. *Environmental Conservation* 19: 261-264.
- Robertson, D.M. 1989. *The use of the lake water temperatures and ice cover as climatic indicators*. Tesis

- de doctorado. University of Wisconsin, Madison, EUA.
- Robertson, G. P., C.S. Bledsoe, D. C. Coleman, & P. Sollins. 1999. *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Oxford University Press, Nueva York, NY, EUA.
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin, III, E. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. Schellnhuber, B. Nykvist, C.A. De Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P.K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R.W. Corell, V.J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen & J. Foley. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* 14(2): 32. En línea: www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/
- Rodiek, J. 2007. Landscape planning in hazardous zones, lessons from Hurricane Katrina, August 2005. *Landscape and Urban Planning* 79: 1-4.
- Rodríguez, J. 1999. *Ecología*. Pirámide. Madrid, España.
- Rodríguez-Troncoso, A.P., E. Carpizo-Ituarte & A.L. Cupul-Magaña. 2010. Differential response to cold and warm water conditions in *Pocillopora* colonies from the Central Mexican Pacific. *Jour. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 391:57-64.
- Rodríguez-Troncoso, A.P., E. Carpizo-Ituarte & A.L. Cupul-Magaña. 2010. Response to sudden increases in temperature (thermal shock) under laboratory conditions in the coral *Pocillopora verrucosa*. *Ciencias Marinas* 36(1):91-98.
- Rodríguez Zaragoza, F.A. 1998. Estructura de la comunidad coralina hermatípica (Scleractinia) de la zona de Carelleros, Nayarit. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara, Guadalajara.
- Rohde, K. 2005. *Nonequilibrium ecology*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Rojo-Vázquez, J. A., B. Aguilar-Palomino, V.H. Galván-Piña, E. Godínez-Domínguez, S. Hernández-Vázquez, S. Ruiz-Ramírez & G. Lucano-Ramírez. 2001a. Ictiofauna de la pesquería ribereña en Bahía De Navidad, Jalisco, México, asociada al evento El Niño 1997-1998. *Revista de Biología Tropical* 49(3): 841-855.
- Romme, W.H. 1982. Fire and landscape diversity in subalpine forests of Yellowstone National Park. *Ecological Monographs* 52 (2): 199-221.
- Romme, W.H. & D.H. Knight. 1981. Fire frequency and subalpine forest succession along a topographic gradient in Wyoming. *Ecology* 62 (2): 319-326.
- Romme, W.H., E.H. Everham, L.E. Frelich, M.A. Moritz, & R.E. Sparks. 1998. Are large infrequent disturbances qualitatively different from small, frequent disturbances? *Ecosystems*. 1:524-534.
- Rozzi, R., C.B. Anderson, J.C. Pizarro, F. Massardo, Y. Medina, A.O. Mansilla, J.H. Kennedy, J. Ojeda, T. Contador, V. Morales, K. Moses, A. Poole, J.J. Armesto & M.T. Kalin. 2010. Filosofía ambiental de campo y conservación biocultural en el Parque Etnobotánico Omora: Aproximaciones metodológicas para ampliar los modos de integrar el componente social ("S") en Sitios de Estudios Socio-Ecológicos a Largo Plazo (SESELP). *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 27-68.
- Ruiz-Jaén, M.C. & T.M. Aide. 2005. Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. *Forest Ecology and Management* 218: 159-173.
- Ruiz-Jaen, M.C. & T.M. Aide. 2005. Restoration success: how is it being measured? *Restoration Ecology* 13(3): 569-577.
- Rykiel, E. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229-244.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa, México, DF, México.
- Sabine, C.L., R.A. Feely, N. Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S. Wong, D.W.R. Wallace, B. Tilbrook, F.J. Millero, T.H. Peng, A. Kozyr, T. Ono & A.F. Rios. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*. 305: 367-371.
- Sachs, W. 1993. Global ecology and the shadow of "development". En: W. Sachs (Ed.) *Global ecology: A new arena of political conflict*. Zed Books. Londres, Reino Unido. Pp. 3-21
- Sala, O. E., & A. T. Austin. 2000a. Methods of estimating aboveground net primary productivity. En Sala O. E, R. B. Jackson, H. A. Mooney, & R. W. Howarth, (Eds.) *Introduction: Methods in ecosystem science: progress, tradeoffs, and limitations*. Springer, Nueva York, NY, EUA. Pp. 33-35.
- Sala, O. E., R. B. Jackson, H. A. Mooney & R. W. Howarth. 2000b. *Methods in Ecosystem Science*. Springer, Nueva York, NY, EUA.
- Saldaña-Acosta-Acosta, A. 2001. Dinámica y patrones de establecimiento de especies de bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. Tesis de Maestría en Ciencias. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF, México.

- Sánchez-Colón, S., A. Flores Martínez, I.A. Cruz-Leyva & A. Velázquez. 2009. Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. En: Sarukhán *et al.* (Eds.) *Capital natural de México*, vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México. Pp. 75-129.
- Sánchez-Gallén, I. & J. Álvarez-Sánchez. 1995. Litterfall in a primary and secondary tropical rain forest of Mexico. *Tropical Ecology* 36(2): 191-201.
- Sánchez-Gallén, I. & J. Álvarez-Sánchez. 1996. Root productivity in a lowland tropical rain forest in Mexico. *Vegetatio* 123: 109-115.
- Sandberg, D.V., Ottmar, R.D. & Cushon, G.H. 2001. Characterizing fuels in the 21st century. *International Journal of Wildland Fire* 10: 381-387.
- Santana C., E. 2000. Dynamics of understory birds along a cloud forest successional gradient in Western Mexico. Ph.D. Thesis. University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, EUA.
- Santana C., E., R. Guzmán-Mejía & E.J. Jardel. 1989. The Sierra de Manantlán Biosphere Reserve: the difficult task of becoming a catalyst for sustained development. En: Gregg, W.P., Krugman, S.L. & Wood, J.D. (Eds.) *Proceedings of the Symposium on Biosphere Reserves*. IV World Wilderness Congress, Estes Park, Colorado, 1987. US Dept. of the Interior, Natl. Park Service, Atlanta, Georgia, EUA. Pp. 212-222.
- Santana, E., S. Navarro, L.M. Martínez, A. Aguirre, P. Figueroa & C. Aguilar. 1993. Contaminación, aprovechamiento y conservación de los recursos acuáticos del Río Ayuquila, Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco-Colima. *Tiempos de Ciencia* 30:29-38.
- Santana C., E., E.J. Jardel, F. Hernández-Vázquez, R. Cuevas-Guzmán, D. Partida-Lara, L.I. Íñiguez-Dávalos & L.E. Rivera-Cervantes. 2004. Investigación y educación en un área protegida. En: R. Cuevas-Guzmán & E.J. Jardel (Eds.). *Flora y Vegetación de la Estación Científica Las Joyas*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. Pp. 7-47.
- Santana C.E., E.J. Jardel & P. Pons. 2009. Manejo del fuego y conservación de la fauna silvestre en ecosistemas forestales de montaña. En: J.G. Flores-Garnica (Ed.). *Impacto ambiental de incendios forestales*. Mundi-Prensa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y Colegio de Postgraduados. México, DF. Pp. 195-222.
- Santiago-Pérez, A.L., E.J. Jardel, R. Cuevas-Guzmán & F.M. Huerta-Martínez. 2009. Vegetación de bordes en un bosque mesófilo de montaña del occidente de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 85: 31-49.
- Sarukhán, J. 1981. Mexico. En Kormondy E. J. & J. F. McCormick, (Eds.). *Handbook of contemporary developments in World Ecology*. Greenwood Press, Westport, Connecticut, EUA. Pp. 35-51.
- Sarukhán, J. & J. M. Maass. 1990. Bases ecológicas para un manejo sostenido de los ecosistemas: el sistema de cuencas hidrológicas. En: E. Leff (Ed.) *Medio ambiente y desarrollo en México*. Volumen I. UNAM (CIH)-Porrúa, México, DF. Pp. 81-114.
- Sarukhán, J., P. Koleff, J. Carabias, J. Soberón, R. Dirzo, J. Llorente-Bousquets, G. Halffter, R. González, I. March, A. Mohar, S. Anta & J. de la Maza. 2009. *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, DF, México.
- Scavia, D., N.N. Rabalais, R.E. Turner, D. Justic & W. J. Wiseman. 2003. Predicting the response of Gulf of Mexico hypoxia to variations in Mississippi River nitrogen load. *Limnology and Oceanography* 48: 951-956.
- Schaaf, P. 2002. Geología y geofísica de la costa de Jalisco. En: Noguera, F., J.H. Vega-Rivera, H.N. García-Aldrete & M. Quesada-Avenidaño (Eds.) *Historia Natural de Chamela*. Instituto de Biología, UNAM, México, DF. Pp.11-76.
- Schemnitz, S.D. (Ed.). 1980. *Wildlife management techniques manual*. Wildlife Society. Bethesda, Maryland, EUA.
- Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. Second Edition, Academic Press, San Diego, California, EUA.
- Schlesinger, W.H. 2006. Global change ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 21(6): 348-351.
- Schmidt, R.H. Jr. 1979. A climatic delineation of the "real" Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments* 2:243-250.
- Schneider, D. C. 2002. Scaling Theory: Application to marine ornithology. *Ecosystems* 5: 736-748.
- Schneider, D.C. 2009. *Quantitative ecology*. Academic Press. Londres, Reino Unido.
- Schnur, R., & K. I. Hasselmann. 2005. Optimal filtering for Bayesian detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics* 24:45-55.

- Schultes, R.E. & S. von Reis. 1995. *Ethnobotany. Evolution of a discipline*. Timber Press, Portland, Oregon, EUA. 414 Pp.
- Schutkowski, H. 2006. *Human Ecology. Biocultural Adaptations in Human Communities*. Springer Verlag, Nueva York, NY, EUA.
- Schwartz, M.W., C.A. Brigham, J.D. Hoeksema, K.G. Lyons, M.H. Mills & P.J. van Mantgem. 2000. Linking biodiversity to ecosystem function: implications for conservation ecology. *Oecologia* 122:297-305.
- Scott, J.M. & B. Csutti. 1996. Gap analysis for biodiversity survey and maintenance. En: Reaka-Kudia M.L., D.E. Wilson & E.O. Wilson (Eds.) *Biodiversity II, understanding and protecting our biological resources*. John Henry Press. Washington, DC, EUA. Pp. 321-340.
- Scott-Morales, L.M. & Estrada, E.C. 1999. *Distribución y Estado Actual del Perro de las Praderas (Cynomys mexicanus Merriam) en el Altiplano Mexicano*. Reporte Final No. PP09. Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), Monterrey, Nuevo León, México.
- Scott-Morales, L. 1999. Conservación y Manejo de Poblaciones de aves Residentes y sus Hábitats. En: O. Sánchez & E. Vázquez-Domínguez (Eds.). *Conservación y Manejo de Vertebrados del Norte Árido y Semiárido de México*. Diplomado en Manejo de Vida Silvestre. Conabio, Dirección General de Vida Silvestre-Semarnap), Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos de América y Facultad de Ciencias Forestales-UANL). Monterrey, Nuevo León, México.
- Scott-Morales, L., E. Escobar, L. Hernández & N. Mercado-Silva. 2008. Biodiversidad generadora de bienes y recursos. *Ciencia y Desarrollo*. (34) 215: 38-43.
- Semarnat. 2006. *Programa de Conservación y manejo de la Reserva de la Biosfera Mapimí*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, DF.
- Shachak, M., J.R. Gosz, S.T.A. Pickett & A. Perevolotsky (Eds.). 2005. *Biodiversity in drylands: toward a unified framework*. Oxford University Press. Nueva York, NY, EUA.
- Sharitz, R., L.R. Boring, D.H. Van Lear & J.E. Pinder III. 1992. Integrating Ecological Concepts with Natural Resource Management of Southern Forests. *Ecological Applications* 2(3):226-237
- Shein, K. A., A.M. Waple, M.J. Menne, J.C. Christy, D.H. Levinson, et al. 2006. State of the climate in 2005. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87: S6-S102.
- Shugart, H.H. 1984. *A theory of forest dynamics*. Springer Verlag. Nueva York, EUA.
- Singh, J.S., W.K. Lauenroth, & R.K. Sernhorst. 1975. Review and assessment of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvest data. *Botanical Review* 41: 181-232.
- Siordia-Cermeño, L., C. Sánchez-Velasco, C. Franco-Gordo & M. Sánchez-Ramírez. 2003. Variación temporal del zooplancton, con énfasis en los crustáceos en la costa de Jalisco y Colima durante un ciclo anual (1996). En: M. Hendricks (Ed.). *Crustáceos del Pacífico*. Vol. II. Pp. 93-101.
- Smil, V. 1997. *Cycles of Life. Civilization and the biosphere*. Scientific American Library. W.H. Freeman. Nueva York, NY, EUA.
- Smith, H. J. 2003. The shape we're in. *Science* 302:1681-1681.
- Smith, T.B., R.K. Wayne, D.J. Girman & M.W. Bruford. 1997. A role for ecotones in generating rainforest biodiversity. *Science* 276: 1855-1857.
- Smith, R. C., B. B. Prezelin, K. S. Baker, R. R. Bidigare, N. P. Boucher, T. Coley, D. Karentz, S. MacIntyre, H.A. Matlick, & D. Menzies. 1992. Ozone depletion: ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science* 255:952-959.
- Smith, V.H., S.B. Joye & R.W. Howarth. 2006. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. *Limnology and Oceanography* 51: 351-355.
- Soberón, J. 1995. Algunas ideas sobre el desarrollo y las perspectivas de la ecología en México. *Ciencia* 46:5-8.
- Solís, V.E. 1993. Variaciones espaciales y temporales en las características físicas y químicas de los suelos de una selva baja caducifolia en Chamela, Jalisco. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México, DF.
- Soule, J., D. Carré & W. Jackson. 1991. *Ecological impact of modern agriculture*. En: Caroll et al. (Eds.) *Agroecology*. MacGraw-Hill, Nueva York, NY, EUA. Pp. 165-188.
- Sousa, W.P. 1984. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15:353-391.
- Southwood, T. & P. Henderson. 2000. *Ecological methods*. Blackwell Science. Oxford, Reino Unido.
- Steffen, W., P.J. Crutzen & J.R. McNeill. 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of Nature? *Ambio* 36:614-621.
- Stohlgren, T.J. 1995. Planning long-term vegetation studies at landscape scales. En: Powell

- T.M., Steele J.H. (Eds.) *Ecological Time Series*. Chapman & Hall, Nueva York, NY, EUA.
- Stohlgren, T.J. 2007. *Measuring plant diversity*. Oxford University Press. Nueva York, NY, EUA.
- Strayer, D., J.S. Glitzenstein, G.C. Jones, J. Kolaza, G.L. Likens, M.J. MacDonnell, G. Parker, & S.T.A. Pickett. 1986. *Long-term ecological studies*. Institute of Ecosystems Studies. Nueva York, NY, EUA.
- Suárez-Morales, E., C. Franco-Gordo & M. Saucedo-Lozano. 2000. On the pelagic copepod community of the central Mexican tropical Pacific (Autumn, 1990). *Crustaceana* 6: 751-761.
- Swank, W.T. & D.A. Crossley (Eds.). 1988. *Forest Hydrology and Ecology at Coweeta*. Springer-Verlag. Nueva York, NY, EUA.
- Swank, W.T. & J.E. Douglas. 1974. Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science* 185(4154):857-859.
- Swanson, F.J., & J.F. Franklin. 1992. New forestry principles from ecosystem analysis of Pacific Northwest Forests. *Ecological Applications* 2:262-274.
- Swanson, F.J.; Jones, J.A.; Wallin, D.O. & Cissel, J.H. 1994. Natural variability implications for ecosystem management. En: Jensen, M.E. & Bourgeron, P.S. (Edit.). *Eastside forest ecosystem health assessment*. Vol 2, Ecosystem management: principles and applications. US Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-318, Pacific Northwest Research Station, Portland, Oregon, EUA. Pp. 89-104.
- Swanson, F.J. & R.E. Sparks. 1990. Long-term ecological research and the invisible place. *BioScience* 40(7): 502-508.
- Symstad, A.J., F.S. Chapin III, D.H. Wall, K.L. Gross, L.R. Huenneke, G.G. Mittelbach, D.P.C. Peters & D. Tilman. 2003. Long-term and large-scale perspectives on the relationship between biodiversity and ecosystem functioning. *BioScience* 53(1): 89- 98.
- Tansley, A.G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 16: 284-307.
- Teal, J.M. 1962. Energy flow in the salt marsh ecosystem of Georgia. *Ecology* 43: 614-624.
- Terradas, J. 2001. *Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes*. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Thompson, J., N. Brokaw, J.K. Zimmerman, R.B. Waide, E.M. Everham, III, D.J. Lodge, C.M. Taylor, D. García-Montiel & M. Fluet. 2002. Land use history, environment, and tree composition in a tropical forest. *Ecological Applications* 12: 1344-1363.
- Tilman, D. 1989a. Ecological experiments: strengths and perceptual problems. En: G. Linkens (Ed.) *Long-term studies in ecology*. Springer-Verlag, Nueva York, NY, EUA. Pp. 136-157.
- Tilman, D. 1989b. *Plant strategies and the dynamics of plant communities*. Princeton University Press. Princeton, NJ, EUA.
- Tilman, D. 1999. The ecological consequences of changes in biodiversity: a search for general principles. *Ecology* 80: 1455-1474.
- Tilman, D., P. Reich, J. Knops, D. Wedin, T. Mielke & C. Lehman. 2001. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. *Science* 294: 843-845.
- Timmerman, A., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Esch, M. Latif & E. Roeckner. 1999. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature* 398: 694-697. Londres.
- Tognetti, S.S., R. Costanza, L. Arizpe, C. Cleveland, H. Daly, P.H. May, M. Richie, J. Ruitenbeek, O. Segura, H. Opschoor & K. Chopra. 1995. *Poverty and the environment*. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Toledo, M. 2001. Efecto del borde selva-potrero en la dinámica de nutrientes asociado a una especie arbórea dominante en un ecosistema tropical estacional. Maestría en Ecología, Instituto de Ecología, AC, Jalapa, Veracruz, México.
- Toledo, V.M. 1996. Latinoamérica: crisis de la civilización y ecología política. *Gaceta Ecológica* 38: 12-22.
- Toledo, V. M. & A. Castillo. 1999. La ecología en Latinoamérica: siete tesis para una ciencia pertinente en una región en crisis. *Interciencia* 24: 157-168.
- Toledo, V.M., J. Caballero, A. Argueta, P. Rojas, E. Aguirre, J. Viccon, S. Martínez, & Ma. Eugenia Díaz. 1978. Estudio botánico y ecológico de la región del río Uxpanapa, Veracruz. No. 7. El uso múltiple de la selva basado en el conocimiento tradicional. *Biotica* 3:85-101.
- Toledo, V.M., B.F. Ortiz-Espejel, L. Cortés, P. Moguel & M.J. Ordoñez. 2003. The multiple use of tropical forests by indigenous peoples of Mexico: a case study of adaptive management. *Ecology and Society* 7(3): 9 [en línea: www.consecol.org/vol7/iss3/art9].
- Torrejón-Arellano, N., G. Ramírez-Ortiz, H. Reyes-Bonilla, A.L. Cupul-Magaña & M.D. Herrero-Pérezrul. 2008. Community structure of echi-

- noderns in the only pristine area of western México. *Gulf of Mexico Science* 26: 166-167.
- Townsend, A.R., R.W. Howarth, F.A. Bazzaz, M.S. Booth, C.C. Cleveland, S.K. Collinge, A.P. Dobson, P.R. Epstein, D.R. Keeney, M.A. Mallin, C.A. Rogers, P. Wayne & A. H. Wolfe. 2003. Human health effects of a changing global nitrogen cycle. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1: 240-246.
- Trenard, Y. 1982. Making wood speak: an introduction to dendrochronology. *Forestry Abstracts* 43(12): 729-759.
- Trejo, I. & R. Dirzo 2000. Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation* 94: 133-142.
- Tudela, F. 1990. Recursos naturales y sociedad en el trópico húmedo tabasqueño. En: E. Leff (Coord.) *Medio ambiente y desarrollo en México*. Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Humanidades, Universidad Nacional Autónoma de México-Miguel Ángel Porrúa. México, DF.
- Turner II, B.L., D. Skole, S. Sanderson, G. Fischer, L. Fresco & R. Leemans. 1995. Land-use and land-cover change science/research plan. *IGBP Report No. 35- HDP Report No. 7*. Estocolmo, Suecia.
- Turner, M.G. 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics* 20: 171-197.
- Turner, M. G. & V. H. Dale. 1998. Comparing large, infrequent disturbances: What have we learned? *Ecosystems* 1: 493-496.
- Turner, M.G., S.L. Collins, A.E. Lugo, J.J. Magnuson, T.S. Rupp & F. J. Swanson. 2003. Disturbance dynamics and ecological response: The contribution of long-term ecological research. *Bioscience* 53: 46-56.
- Turner, R.E., N.N. Rabalais & D. Justic. 2006. Predicting summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico: Riverine N, P, and Si loading. *Marine Pollution Bulletin* 52:139-148.
- Underwood, A.J. 1998. Relationships between ecological research and environmental management. *Landscape and Urban Planning* 40:123-130.
- UNESCO. 1972. International Coordinating Council of the Programme on Man and the Biosphere (MAB). First Session Final Report. MAB Report Series N° 1. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. París, Francia.
- UNESCO. 1989. Man and the Biosphere (MAB) Programme. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. París, Francia.
- UNESCO. 2003. *Réserves de biosphere: des lieux privilégiés pour les hommes et la nature*. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture. París, Francia.
- Unkovich, M., J. Pate, A. McNeill, & D.J. Gibbs (Eds.). 2002. Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems. Kluwer, Dordredtch, Países Bajos.
- Urban, D.L., R.V. O'Neill & H.H. Shugart, Jr. 1987. Landscape Ecology. *BioScience* 37 (2): 119-127.
- Urbina-Cardona, J.N., M. Olivares-Pérez. & V. Reynoso. 2006. Herpetofauna diversity and microenvironment correlates across a pasture-edge-interior ecotone in tropical rainforest fragments in the Los Tuxtlas Biosphere Reserve of Veracruz, Mexico. *Biological Conservation* (132): 61-75.
- Urteaga, L. 1987. *La tierra esquilada: las ideas sobre la conservación de la naturaleza en la cultura española del siglo XVIII*. Serbal-Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Barcelona.
- Utrera-López, M.E. & P. Moreno-Casasola. 2008. Mangrove litter dynamics in La Mancha Lagoon, Veracruz, Mexico. *Wetlands Ecology and Management* 16:11-22.
- Valentini, R. (Ed.). 2003. *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*. Springer Verlag. Nueva York, ny, eua. Ecological Studies, Vol. 163
- Van Wagner, C.E. 1968. The line intersect method in forest fuel sampling. *Forest Science* 14: 20-26.
- Vázquez, J.A., R. Cuevas-Guzmán, T.S. Cochrane, H.H. Iltis, F. Santana-Michel & L. Guzmán-Hernández *Flora de Manantlán*. Sida Botanical Miscellany No. 13, Botanical Research Institute of Texas-Universidad de Guadalajara-University of Wisconsin, Madison-Conabio. Forth Worth, Texas, EUA.
- Varela-Fregoso, L., A. Estrada Torres, J. Álvarez-Sánchez e I. Sánchez-Gallén. 2008. Catálogo ilustrado de hongos micorrizógenos arbusculares de la Reserva de la Biosfera de los Tuxtlas. Semarnat-Conacyt. gef. tsbf. ciat. Instituto de Ecología, AC. Facultad de Ciencias, UNAM. México, DF. Ejemplar en CD.
- Vargas-Jaramillo, S. 2010. Efectos del fuego sobre la biodiversidad en bosques montanos subtropicales de la Sierra de Manantlán. Tesis. Maestría en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Universidad de Guadalajara-CUCSur. Autlán, Jalisco, México.
- Vaughan, H. 2005. The irreplaceable role of long-term ecological monitoring in decision making.

- 5th North American Forest Ecology Workshop. Gatineau, Quebec, Canadá. Pp. 194
- Velarde, E., E. Ezcurra, M.A. Cisneros-Mata & M.F. Lavín (2004) Seabird ecology, El Niño anomalies, and prediction of sardine fisheries in the Gulf of California. *Ecological Applications*: 14 (2): 607-615.
- Velázquez, A. & G. Bocco. 2001. Land unit approach for biodiversity mapping. En: D. Van der Zee & I.S. Zonneveld (Eds.). *Land evaluation, development and conservation*. ITC. Enschede, Países Bajos. Pp. 273-285.
- Verrill, A.E. 1864. List of the polyps and corals sent by the Museum of Comparative Zoology to other institutions in exchange, with annotations. *Bull. Mus. Comp. Zool. Harvard* 1: 29-60.
- Villalobos, F.A., V.R. de la Parra, B.E. Galván P., O.J. Cacho R. & M.A. Izaguirre P. 1984. Estudio hidrobiológico de la Laguna de la Mancha, municipio de Actopan, Ver. 1979-1980. *Cuadernos de Divulgación* 15. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos, Xalapa, Veracruz, México.
- Villers-Ruiz, L. & I. Trejo-Vázquez 1998. Climate Change on Mexican Forest and Natural Protected Areas. *Global Environmental Change* 8(2): 141-157.
- Viramontes-Pereida, D. 1992. Redistribución espacial del agua en el paisaje, escurrimiento y erosión hídrica a través de una toposecuencia. Le milieu physique. En: Delhoume J.P., Maury M.E. (Eds.), *Actas del seminario : Mapimí*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Ver., México. Pp. 143-160.
- Vital-Rumebe, A & O. Grunberger, 2005. Los cultivos de playa: evolución después del abandono. En: Grünberger O., V.M. Reyes Gómez & J.L. Janeau (Eds.) *Las Playas del Desierto Chihuahuense (Parte Mexicana), influencia de las sales en medio ambiente árido y semi-árido*; IRD-Inecol.
- Vitousek, P.M. 1992. Global environmental change: an introduction. *Annual Review of Ecology and Systematics* 23: 1-14.
- Vitousek, P.M., C.M. D'Antonio, L.L. Loope & R. Westbrooks. 1996. Biological invasions as global environmental change. *American Scientist* 84: 468-478.
- Vitousek, P.M., P.E. Ehrlich, A.H. Ehrlich & P.A. Matson. 1986. Human appropriation of the products of photosynthesis. *BioScience* 36(6): 368-373.
- Vitousek, P. M., H. A. Mooney, J. Lubchenco & J. M. Melillo. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.
- Vose, J.M. & J. M. Maass. 1999. A Comparative analysis of hydrologic responses of tropical deciduous and temperate deciduous watershed ecosystems to climatic change. En: C. Aguirre-Bravo and C. Rodríguez-Franco (Comp). 1999. *North American science Symposium: Toward a unified framework for inventorying and monitoring forest ecosystem resources*. Guadalajara, México (November 2-6, 1998). USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-12: 292-298.
- Vose, J.M. 2005. Long-term ecological research: challenges and opportunities for understanding ecosystem structure and function. 5th North American Forest Ecology Workshop. Gatineau, Quebec, Canadá. Pp. 197
- Walker, B. & D. Salt. 2006. *Resilience thinking*. Island Press. Washington DC, EUA.
- Walters, C.J. 1998. Improving links between ecosystem scientists and managers. En: Pace. M.J. & P.M. Groffman. *Successes, limitations and frontiers in ecosystem science*. Springer, Nueva York, EUA.
- Walters, C.J. & C.S. Holling 1990. Large-scale management experiments and learning by doing. *Ecology* 71: 2060-2068.
- Watt, A.S. 1947. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology* 35: 1-22.
- Watt, K.E.F. 1968. *Ecology and resource management*. McGraw-Hill. Nueva York, NY, EUA.
- Weatherhead, P. J. 1986. How unusual are unusual events? *The American Naturalist*, 128:150-154.
- Webster, P., J. Holland, G.J. Curry & H.R. Chang. 2005. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science* 309:1844-1846.
- Weigel, B.M., L. Henne & L. M. Martinez-Rivera. 2002. Macroinvertebrate-based index of biotic integrity for protection of streams in west-central Mexico. *Journal of the North American Benthological Society* 21(4): 686-700.
- Westerling, A.L., H.G. Hidalgo, D.R. Cayan, T.W. Swetnam. 2006. Warming and Earlier Spring Increase Western us Forest Wildfire Activity. *Science* 313: 940-943.
- Whelan, K.R.T., T.J. Smith, D.R. Cahoon, J.C. Lynch & G.H. Anderson. 2007. Groundwater control of mangrove surface elevation: shrink and swell varies with soil depth. *Estuaries and Coasts* 28 (6): 833-843.

- Whittaker, R.H. 1975. *Communities and ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, NJ, EUA.
- White, P.S. 1979. Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review* 45(3): 229-299.
- White, P.S. & S.P. Bratton. 1980. After preservation: philosophical and practical problems of change. *Biological Conservation* 18:241-255.
- Whitney, G.G. 1994. *From coastal wilderness to fruited plain. A history of environmental change in temperate North America 1500 to the present*. Cambridge University Press, Nueva York, NY, EUA.
- Whittaker, R. 1975. *Communities and ecosystems*. MacMillan, Nueva York, NY, EUA.
- Whittaker, R.H., & P.L. Marks. 1975. Methods of Assessing Terrestrial Productivity. En: Lieth, H., Whittaker, R.H. (eds.). *Primary Productivity of the Biosphere*. Ecological Studies 14. Springer-Verlag, Nueva York. Pp. 55-118.
- Wiens, J. 1997. Lengthy ecological studies. *Trends in Ecology and Evolution* 12: 499.
- Wilcox, B.A., P.F. Brussard & B.C. Marcot. (eds.) 1986. *The Management of Viable Populations: Theory, Applications and Case Studies*. Stanford, California: Center for Conservation Biology, Department of Biological Sciences, Stanford University.
- Williams, E.H. & L. Bunkley-Williams. 1990. The world wide coral bleaching cycle and related sources of coral mortality. *Atoll Res. Bull.* 335: 1-71. Smithsonian Institute, Washington, DC.
- Wilson, D.E., F.R. Cole, J.D. Nichols, R. Rudran & M.S. Foster (Eds.). 1996. *Measuring and Monitoring Biological Diversity*. Smithsonian Institution Press, Washington DC, EUA.
- Wilson, E.O. 1992. *La diversidad de la vida*.
- Wood, T., D. Lawrence & D.A. Clark. 2006. Determinants of leaf litter nutrient cycling in a tropical rain forest: fertility versus topography. *Ecosystem* 9: 700-710.
- Worster, D. 1985. *Nature's economy: a history of ecological ideas*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Wright, E.E., A.C. Hine, S.L. Goodbred & S.D. Locker. 2005. The effect of sea-level and climate change on the development of a mixed siliclastic-carbonate, deltaic coastline: Suwanee River, Florida, USA. *Journal of Sedimentary Research* 74(4): 621-635.
- Yañez-Arancibia, A., & J. W. Day. 2004. The Gulf of Mexico: towards an integration of coastal management with large marine ecosystem management. *Ocean & Coastal Management* 47: 537-563.
- Yañez-Arancibia, A., A. L. Lara-Domínguez, J. L. R. Galaviz, D. J. Z. Lomelí, G. J. V. Zapata, & P. Sanchez-Gil. 1999. Integrating science and management on coastal marine protected areas in the Southern Gulf of Mexico. *Ocean & Coastal Management* 42: 319-344.
- Young, G.L. 1974. Human ecology an interdisciplinary concept: a critical inquiry. *Advances in Ecological Research* 8: 1-105.
- Zarco, A. 1994. Efecto de la lluvia en la humedad del suelo de un ecosistema tropical estacional. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. México, DF.

Acerca de los autores

- JAVIER ALCOCER DURAND. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Alchichica. jalco-
cer@servidor.unam.mx
- JOSÉ TULIO ARREDONDO MORENO. Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología, Grupo Gracilis. tulio@
ipicyt.edu.mx
- JAVIER ÁLVAREZ SÁNCHEZ. Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. ja-
vier.alvarez@ciencias.unam.mx
- RICARDO AYALA BARAJAS. Estación de Biología de Chamela, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Chamela. rayala@ibiologia.unam.mx
- LUIS EDUARDO CALDERÓN AGUILERA. Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Grupo Arrecifes del Pacífico. leca@
cicese.mx
- ALICIA CASTILLO ÁLVAREZ. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Chamela. castillo@oikos.
unam.mx
- GERARDO CEBALLOS GONZÁLEZ. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Chamela. gceballo@miranda.ecologia.
unam.mx
- ARMANDO EQUIHUA MARTÍNEZ. Colegio de Postgraduados, Instituto de Fitosanidad. equi-
huuaa@colpos.colpos.mx
- MIGUEL EQUIHUA ZAMORA. Instituto de Ecología A.C., Coordinador Nacional de la Red MEXLTER. equihuam@inecol.edu.mx
- JOSE G. GARCÍA FRANCO. Instituto de Ecología A.C. Grupo La Mancha. jose.garcia.franco@inecol.
edu.mx
- ENRIQUE GODÍNEZ DOMÍNGUEZ. Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Grupo Ecosistemas Costeros. egodinez@costera.mela-
que.udg.mx
- LUCINA HERNÁNDEZ GARCÍA. Instituto de Ecología A.C., Centro Regional Durango, Grupo Mapimí. lucina.hernandez@inecol.edu.mx
- JORGE ALFREDO HERRERA SILVEIRA. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Grupo ECOPEY. jherrera@mda.cinvestav.mx
- ELIZABETH HUBER SANNWALD. Instituto Potosino de Ciencia y Tecnología, Grupo Gracilis. ehs@ipi-
cyt.edu.mx
- LUIS IGNACIO ÍÑIGUEZ DÁVALOS. Departamento de Ecología y Recursos Naturales-IMECBIO, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Grupo Manantlán. liniguez@
cucsur.udg.mx
- ENRIQUE J. JARDEL PELÁEZ. Departamento de Ecología y Recursos Naturales-IMECBIO, Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara, Grupo Manantlán. ejardel@
cucsur.udg.mx
- JORGE A. LÓPEZ-PORTILLO. Instituto de Ecología A.C., Grupo Mapimí. jorge.lopez.portillo@inecol.edu.
mx
- JOSÉ MANUEL MAASS MORENO. Centro de Investiga-
ciones en Ecosistemas, Universidad Nacional

- Autónoma de México, Grupo Chamela. maass@oikos.unam.mx
- ANGELINA MARTÍNEZ YRÍZAR. Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Chamela. angelina@servidor.unam.mx
- RODRIGO A. MEDELLÍN LEGORRETA. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. medellin@miranda.ecologia.unam.mx
- MARISELA PANDO MORENO. Universidad Autónoma de Nuevo León, Grupo Ecosistemas del Altiplano. mapando@fcf.uanl.mx
- LUCIANA PORTER BOLLAND. Instituto de Ecología A.C. luciana.porter@inecol.edu.mx
- HÉCTOR REYES BONILLA. Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Grupo Arrecifes del Pacífico. hreyes@uabcs.mx
- VÍCTOR HUGO REYNOSO ROSALES. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Los Tuxtlas. vreynoso@ibunam.ibiologia.unam.mx
- VICTOR HUGO RIVERA MONROY. School of the Coast and Environment, Louisiana State University, Grupo ECOPEY. vhrivera@lsu.edu
- MARTIN RICKER REYMANN. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo Los Tuxtlas. mricker@ibiologia.unam.mx
- LAURA M. SCOTT MORALES. Universidad Autónoma de Nuevo León, Grupo Ecosistemas del Altiplano. lscott@fcf.uanl.mx

*La investigación ecológica
a largo plazo en México*
se terminó de imprimir en mayo de 2013
en los talleres de Ediciones de la Noche
Madero #687, col. Centro,
Guadalajara, Jalisco
El tiraje fue de 1,000 ejemplares.

www.edicionesdelanoche.com

La investigación ecológica a largo plazo en México

La ecología es una ciencia que tiene un papel esencial en la generación de conocimiento y entendimiento de patrones y procesos que constituyen el fundamento de la gestión ambiental, la conservación de la diversidad biológica y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales. En un país considerado como uno de los que albergan mayor diversidad biológica en el mundo, y que al mismo tiempo enfrenta serios problemas de deterioro ambiental, la aplicación de la ecología resulta particularmente relevante. Como parte del proceso para enfrentar este desafío, se ha conformado la Red Mexicana de Investigación Ecológica a Largo Plazo (Red MEX-LTER). Esta red ha sido el resultado de un amplio esfuerzo de investigadores de varias instituciones del país y colaboradores del extranjero, para avanzar en el desarrollo de la ciencia de la ecología y su aplicación en México.

En este libro se presentan los antecedentes que dieron origen al enfoque de investigación ecológica a largo plazo en el mundo, su relevancia para México y cómo fue el proceso de formación de la red mexicana, planteando el marco conceptual que ha servido como base para su diseño y operación. Asimismo, se describen las áreas temáticas que conforman la agenda de investigación de la Red MEX-LTER, las líneas de monitoreo que aborda, al igual que los mecanismos para la gestión de la información en los sitios de estudio y en el trabajo en red. Finalmente, se refieren las labores que realizan los grupos y miembros individuales de la red.

Se espera que los temas que aquí se presentan generen un proceso de análisis que permita ir construyendo un enfoque de trabajo dirigido al conocimiento, valorización y conservación del rico patrimonio natural de México.

Universidad de Guadalajara
Centro Universitario
de la Costa Sur

Red Mexicana de Investigación
Ecológica a Largo Plazo

