

LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES: UN DIVERSO CAPITAL NATURAL

ANGELINA MARTÍNEZ-YRÍZAR,¹ RICHARD S. FELGER² Y ALBERTO BÚRQUEZ¹

RESUMEN. Los ecosistemas de Sonora forman un continuo de variación ecológica desde la costa árida del alto Golfo de California hasta las montañas frías y húmedas en lo alto de la Sierra Madre Occidental. Incluyen una multitud de tipos de vegetación, ecotonos y alta diversidad relacionados con la gran variabilidad climática, edáfica y topográfica de la región; desde los manglares, dos tipos de matorral espinoso y el Desierto Sonorense, con cuatro de sus siete subdivisiones, al bosque tropical caducifolio, los pastizales, los encinares y los bosques de pino-encino y mixtos de coníferas en las áreas de mayor elevación. Estos ecosistemas proveen de bienes y servicios a la sociedad, cuyo valor no es difícil de apreciar, pero en realidad es infinito. Aunque existen vacíos de información sobre la flora de esta gran región de México, numerosos estudios botánicos describen su riqueza de especies, formas de vida, endemismos y rangos de distribución que en Sonora alcanzan el límite norte de su distribución neotropical. Son muy contados los estudios a nivel del ecosistema que analicen procesos funcionales, tales como la productividad primaria, el ciclaje de nutrientes y el almacenamiento de carbono y no existe aún información sobre el valor de estos ecosistemas en términos de su capacidad para proveer servicios de beneficio para la sociedad. Los ecosistemas de Sonora están fuertemente amenazados por disturbio antropogénico, principalmente transformación a agricultura, praderas para uso pecuario, minería, urbanización y desarrollos costeros. Numerosos procesos clave del ecosistema son vulnerables a la intervención humana y la pérdida del capital natural está directamente relacionada con las pautas de consumo de energía, de aprovechamiento de la tierra y con el crecimiento demográfico, por lo que son urgentes acciones ecológicas, políticas y sociales coordinadas para conservar sus bienes y servicios.

¹ Universidad Nacional Autónoma de México.

² San Diego Natural History Museum.

ABSTRACT. The ecosystems of Sonora form a continuum of ecological variation from the arid coast of the upper Gulf of California to the winter-cold and humid mountains at the top of the Sierra Madre Occidental. Along this gradient there is a multitude of contrasting environmental conditions, types of vegetation, ecotones and high biodiversity related to the considerable climatic, edaphic and topographic variability of the region. Sonoran vegetation includes: mangroves, four of the seven Sonoran Desert subdivisions, two types of thornscrub, tropical dry forest, grasslands, oak forests and woodlands, pine-oak forests, and mixed conifer forest in higher mountains. These ecosystems provide numerous goods and services to society that can be appraised economically, but are of infinite value in reality. Although there are substantial gaps in the knowledge of the flora of this region, many studies describe the species richness, diversity of life forms, endemisms and distributions. Studies at the ecosystem level analyzing functional processes such as primary productivity, nutrient cycling and carbon accumulation are very limited, and there is a lack of factual information about the value of these ecosystems in terms of their capacity to provide services to society. Sonoran ecosystems are at risk by anthropogenic disturbance including transformation to agriculture, pastures, mining, urbanization and multiple coastal developments. Many key ecosystem processes are vulnerable to human intervention, and the loss of the natural capital is directly related to the patterns of energy use, land exploitation and population growth, so that urgent actions are ecological, social and political coordinated to keep their goods and services.

INTRODUCCIÓN

La diversidad de ecosistemas es un concepto usado

para denotar la variedad o distintos tipos de ecosistemas presentes en un determinado lugar. Desde la perspectiva de la ecología de ecosistemas, este capítulo trata sobre la diversidad de ecosistemas terrestres en el estado de Sonora, para lo cual se abordan los siguientes aspectos: 1) la definición del concepto ecosistema y de sus propiedades emergentes, incluyendo los servicios ecosistémicos y la importancia ecológica y social de la evaluación del capital natural; 2) una breve descripción de los tipos de ecosistemas que, por su extensión, valor intrínseco o características distintivas, se consideran los más representativos de Sonora; 3) una presentación de los resultados más sobresalientes de los pocos estudios ecológicos realizados en Sonora con un enfoque ecosistémico; 4) una propuesta de evaluación de la importancia relativa de cada uno de los ecosistemas de Sonora en función de su capacidad para proveer servicios; 5) un breve análisis de los principales agentes de alteración y fragmentación del paisaje que amenazan la integridad funcional de los ecosistemas terrestres de Sonora y que, por lo tanto, ponen en riesgo la provisión de bienes y servicios vitales para la sociedad.

EL CONCEPTO ECOSISTEMA

El ecosistema se define como una unidad funcional de la naturaleza que consiste de todos los organismos que viven en un área determinada y que interactúan entre sí y con el ambiente que los rodea. Todos los ecosistemas están constituidos por un componente biótico, o comunidad biológica, y un componente abiótico, o conjunto de factores físicos y químicos que varían continuamente en espacio y tiempo. Debido a la inherente naturaleza dinámica de los ecosistemas y al gran número de factores que alteran frecuentemente sus bordes, las fronteras entre ecosistemas son difusas, excepto en situaciones como la franca separación entre un ecosistema acuático y uno terrestre o cuando existen cambios abruptos en las condiciones del suelo que alteran el patrón de distribución de las plantas. Generalmente se forman ecotonos o zonas de

transición entre bordes que pueden albergar a otras especies, además de las especies de las áreas homogéneas que éstos separan. Los ecosistemas son sistemas termodinámicamente abiertos, por lo que mantienen un continuo intercambio de materia y energía con su entorno. Ya que están interconectados, lo que afecta a un ecosistema afecta a los ecosistemas colindantes (Osborne, 2000; Chapin *et al.*, 2002).

Hay muchos tipos de ecosistemas terrestres que difieren en estructura y funcionamiento. Las diferencias climáticas de un lugar a otro determinan en gran medida los tipos de ecosistemas que existen y la forma en la que los distinguimos depende de la fisionomía de la vegetación dominante, la cual está influenciada principalmente por el macroclima. También se pueden diferenciar por otras características, como el efecto de continentalidad o la cercanía con el mar, que separa, por ejemplo, a los desiertos fríos de los cálidos, o por efecto de la topografía que separa a los ecosistemas de las partes altas de las montañas de aquellos situados en los valles (Whittaker, 1975; Osborne, 2000).

La ecología de ecosistemas estudia cómo actúan los ecosistemas y los mecanismos que determinan su estructura y funcionamiento. Analiza los procesos que ocurren entre el componente biótico y abiótico a una escala espacio-temporal grande (Bormann y Likens, 1979). Estos procesos se relacionan básicamente con la transformación de la energía y la circulación de nutrientes, los cuales originan propiedades emergentes del ecosistema, esto es, propiedades que no se explican por la suma de sus partes (Chapin *et al.*, 2002). Así, los estudios ecosistémicos analizan propiedades tales como la cantidad de energía solar que es convertida por fotosíntesis en materia orgánica y su tasa de acumulación (productividad primaria), la degradación de la materia orgánica (descomposición), la energía y los materiales que fluyen a lo largo de los eslabones de la cadena alimenticia (estructura trófica), las tasas a las que ocurren estos procesos (flujo de energía) y el movimiento de elementos entre la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera (ciclos biogeoquímicos) a diferentes niveles de resolución espacial y temporal. Estos estudios también tratan

de explicar la relación que existe entre la complejidad del ecosistema y otros atributos como su estabilidad, resiliencia y vulnerabilidad. Por su enfoque, la ecología de ecosistemas es un campo de estudio interdisciplinario, por lo que interactúa con la edafología, la hidrología, la climatología y la ecofisiología para explicar los mecanismos físicos, químicos y biológicos que determinan la estructura de los ecosistemas y los procesos que éstos mantienen (Chapin *et al.*, 2002).

Hoy en día es incuestionable la fuerte relación que existe entre las actividades humanas y la problemática ambiental. Por eso, en el desarrollo de estudios a nivel de ecosistema ha sido cada vez más importante la interacción de la ecología con las ciencias sociales (DeFries *et al.*, 2004; Dietz *et al.*, 2007); un nuevo y vigoroso campo de investigación que en México es apenas incipiente (Castillo, 2006; Luque-Agraz y Robles-Torres, 2006; Romero-Lankao, 2006). La incorporación de la dimensión humana (*i.e.*, demografía, valores sociales, instituciones político-sociales, estructuras económicas, fuerzas de mercado y procesos históricos) ha sido crucial en la creación de marcos conceptuales y en los avances y consolidación de estudios de conservación, manejo y restauración de ecosistemas (MA, 2005).

BIENES Y SERVICIOS DEL ECOSISTEMA

Los ecosistemas proveen de bienes y servicios que son críticos para la vida y esenciales para el desarrollo económico de la sociedad. Los componentes de bienestar humano ligados a estos servicios son materiales básicos para una buena vida, para la salud, la seguridad personal, la libertad de elección y la acción y la cohesión social, entre otros factores (MA, 2005). Paradójicamente, el valor intrínseco de los servicios ecosistémicos es raramente tomado en cuenta en la toma de decisiones de la política ambiental (Daily *et al.*, 1997).

Los servicios del ecosistema se agrupan en cuatro categorías: 1) de provisión, 2) culturales, 3) de regulación y, 4) de soporte (Daily, 1997a). Los pri-

meros se derivan de la fotosíntesis y son recursos extractivos como alimentos, plantas medicinales, combustible y materiales de construcción. Los servicios culturales son los que se relacionan con la provisión de beneficios no materiales como la belleza escénica y la inspiración intelectual. Los servicios de regulación resultan de procesos no extractivos como el control de inundaciones y de erosión, la purificación del agua y la regulación de enfermedades y plagas. Los servicios de soporte, que son necesarios para la provisión de los otros servicios, incluyen beneficios intangibles como la formación de materia orgánica, la producción de oxígeno, la desintoxicación del suelo y el ciclo de nutrientes (Daily *et al.*, 1997; MA, 2005).

Resulta obvio que algunos de estos servicios se pueden traducir a valor económico. Sin embargo, otros son técnicamente difíciles de evaluar, porque no son directamente cuantificables o porque los métodos económicos actuales de valuación de mercado no son los apropiados o no pueden ser aplicados para este fin (Costanza *et al.*, 1997; Daily, 1997b; WSTB, 2004). Aun en presencia de discusiones filosóficas biocéntricas o antropocéntricas de la noción de valor, existen numerosos trabajos que discuten la importancia de establecer un sistema de evaluación económica del capital natural, considerando que son muchas las ventajas de dicho sistema tanto en términos ecológicos como en términos de las acciones de conservación, manejo y restauración de ecosistemas. Se argumenta que un sistema de valuación es importante para: 1) definir la capacidad de cada tipo de ecosistema para proveer distintos servicios, 2) mejorar la toma de decisiones y resolver conflictos de elección entre conservar y restaurar un ecosistema o autorizar la expansión de las actividades humanas, 3) medir los costos económicos que se pueden evitar si se tuvieran que reemplazar servicios vitales que se pierden como resultado del disturbio antrópico y, 4) identificar señales de alerta de alteración fundamental de los servicios ecosistémicos que causen pérdidas de recursos ecológicos, económicos y sociales (Daily *et al.*, 1997; WSTB, 2004; MA, 2005; Haberl *et al.*, 2007).

LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES DE SONORA

En Sonora se pueden reconocer cinco regiones naturales principales en un gradiente ambiental geográfico de norte a sur y de este a oeste: 1) el verdadero desierto en la región noroeste, 2) una faja árida y semiárida en las planicies del centro, 3) los deltas de grandes ríos y sus tributarios que drenan hacia el Golfo de California y los ambientes de transición hacia la línea de costa, 4) una faja tropical y subtropical a lo largo del piedemonte de la Sierra Madre Occidental, 5) una faja templada en las partes de mayor elevación de la Sierra Madre Occidental en los límites con Chihuahua y en las «islas del cielo» de las montañas del noroeste de Sonora.

El clima de la región varía desde el libre o casi libre de heladas al tropical seco y templado, del húmedo en los cañones y en lo alto de las montañas al seco y extremadamente árido en el desierto. Al este y en las elevaciones altas de Sonora predominan las condiciones semiáridas, pero la aridez se incrementa gradualmente hacia el norte y oeste. En general, la precipitación total anual aumenta con la elevación, pero disminuye de sur a norte y de este a oeste (figura 1). En los sitios de menor precipitación las lluvias son más esporádicas e impredecibles. Este último rasgo es, en muchos sentidos, de mayor significado biológico que la cantidad promedio anual de precipitación (Ezcurra y Rodríguez, 1986). En general se puede decir que la distribución de los tipos de vegetación y la riqueza y abundancia de los recursos naturales de Sonora es paralela a estos gradientes (figura 2), aunque variaciones acentuadas en las características del suelo pueden causar desviaciones del patrón general (Goldberg, 1982; Búrquez *et al.*, 1992 y 1999; Felger *et al.*, 2001; Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006).

No sorprende que en esta región de extremos se presente una gran variedad de ambientes, formas de vida y riqueza de especies que han llamado la atención de estudios botánicos por muchos años (Cartron *et al.*, 2005; Felger *et al.*, 2007a y 2007b). Algunos de estos trabajos se han convertido en la referencia estándar de la vegetación del noroeste de México (*v.g.*, Gentry, 1942; White, 1948; Shreve,

1951; Marshall, 1957; Felger y Lowe, 1976; Rzedowski, 1978; Brown, 1982; Ezcurra *et al.*, 1987; Martin *et al.*, 1998; Turner *et al.*, 1995; Van Devender *et al.*, 2000 y 2005; Felger, 2000; Felger *et al.*, 2001).

Ya que existe una estrecha correspondencia entre la comunidad de plantas y las tasas a las que ocurren los procesos del ecosistema, en este capítulo nos referiremos a los principales tipos de ecosistema de Sonora por la vegetación dominante que los constituye o porque representan alguna de las regiones fitogeográficas descritas por Shreve (1951). Además, incluimos un ecosistema nuevo para Sonora, el pastizal de zacate buffel, dominado por una gramínea que fue introducida al estado hace algunas décadas para incrementar la productividad de las tierras de agostadero. En la actualidad esta gramínea no se limita a las áreas donde fue sembrada, sino que ha invadido naturalmente extensas áreas de la región noroeste del estado con consecuencias ecológicas negativas e irreversibles no previstas (Búrquez *et al.*, 1998; Franklin *et al.*, 2006). La dinámica de los procesos del funcionamiento de la mayoría de los ecosistemas de Sonora no ha sido aún estudiada, por lo que en este capítulo la descripción de las características de cada uno será abordada principalmente en función de la composición florística, las especies dominantes y los atributos de la vegetación. Los principales ecosistemas que se describen en este capítulo son 13 (tabla 1).

Desierto Sonorense

El Desierto Sonorense es uno de los biomas más importantes de Norteamérica. Ocupa una región de aproximadamente trescientos mil kilómetros cuadrados en el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos. Debe su nombre a que un tercio de su extensión total se encuentra en el estado de Sonora. Su clima se caracteriza por presentar veranos muy calientes, inviernos benignos, alta variación a lo largo del año en la diferencia de temperatura día/noche y también alta variación en la cantidad de lluvia anual típicamente bimodal con picos en invierno y verano. La temperatura y la pre-

Tabla 1. Principales tipos de ecosistemas terrestres de Sonora considerados en este trabajo

Desierto Sonorense	Subdivisión Valle del Bajo Río Colorado (1) Subdivisión Altiplano de Arizona (2) Subdivisión Costa Central del Golfo (3) (incluye islas del Golfo y manglares) Subdivisión Planicies de Sonora (4)
Matorral Espinoso	Matorral Espinoso de Piedemonte (5) Matorral Espinoso Costero (6)
Bosque Tropical Caducifolio (7)	
Bosque Madrense	Encinar (8) Bosque de Pino-Encino (9) Bosque Mixto de Coníferas (10)
Pastizal de Altura (11)	
Desierto Chihuahuense (12)	
Pastizal de Zacate Buffel (13)	

precipitación varían igualmente en forma marcada dependiendo de la latitud, la elevación y la importancia relativa de la influencia continental y marina (Shreve, 1951; Turner *et al.*, 1995; Búrquez *et al.*, 1999). Shreve (1951) identificó siete subdivisiones de la vegetación del Desierto Sonorense basadas en las características y organización de las comunidades de plantas y en su ámbito geográfico de distribución. De las siete subdivisiones cuatro están representadas en Sonora y una de ellas (Planicies de Sonora) es exclusiva del estado (figura 2). En Sonora estas unidades cubren una enorme diversidad de hábitats que bien pueden corresponder a fronteras geomórficas, edáficas, hidrológicas, climáticas o de historia de uso de suelo (Felger, 2000). Las características más sobresalientes de cada uno de estas cuatro subdivisiones son las siguientes:

Valle del Bajo Río Colorado

Es la segunda subdivisión más extensa de la región del Desierto Sonorense en Sonora y cubre aproximadamente tres millones de hectáreas (figura 2). Nombrada por Shreve (1951) la región *Larrea-Ambrosia*, incluye el Delta del Río Colorado, que drena en el Golfo de California, y tierras bajas (<400 m) hasta las cercanías del Arroyo Arivaipa; forma una cuña orientada hacia el sur entre las subdivisiones Costa Central del Golfo y Planicies de Sonora (figura 2). Es una de las regiones más áridas de Sonora, con precipitaciones escasas e im-

predecibles de menos de 75 mm anuales. La vegetación de las planicies en suelos predominantemente arenosos es un desierto micrófilo estructuralmente simple dominado por *Larrea divaricata* y *Ambrosia deltoidea* o *A. dumosa*, con una rica flora de plantas efímeras estacionalmente abundantes. Aunque de estructura simple, en esta subdivisión existe una considerable variación florística y de vegetación entre diferentes hábitats (Felger *et al.*, 2007a). Esta región alberga dos de las reservas de la biosfera más importantes de México: la del Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado y la de El Pinacate y Gran Desierto de Altar, las cuales, desde 1995, forman parte de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). Estas dos reservas incluyen prominentes sierras volcánicas, sierras graníticas, numerosos cráteres de origen volcánico, extensos flujos de lava, el sistema de dunas móviles más extenso de Norteamérica (figura 3), amplias planicies, remanentes del Gran Delta del Río Colorado, un complejo sistema de hábitats costeros y numerosos oasis del desierto alimentados por el acuífero del Gran Desierto de Altar (Felger, 1980; Ezcurra *et al.*, 1987 y 1988; Felger, 2000; Felger *et al.*, 2007a y 2007b). La vegetación es dinámica y su apariencia actual, especialmente en la región de El Pinacate, es en gran medida el resultado de la presencia de años extremadamente secos desde mediados del siglo

pasado a la fecha (Turner *et al.*, 2003). El sistema de dunas del Gran Desierto y los cráteres y flujos de lava de El Pinacate albergan una gran variedad de hábitats, muchos de ellos de condiciones extremas en donde las plantas no prosperan, pero otros únicos, con una flora relativamente rica en especies y plantas endémicas (Felger, 2000).

Altiplano de Arizona

Hacia el este del Valle del Bajo Río Colorado se localiza el Altiplano de Arizona que ocupa en Sonora una extensión aproximada de 1.6 millones de hectáreas entre Sonoyta y Magdalena (figura 2). Es la subdivisión del Desierto Sonorense de mayor elevación en el estado (de 150 a 950 msnm). La precipitación varía de 75 a 300 mm y las temperaturas de congelación son comunes. La vegetación es un desierto crasicalescente dominado por arbustos bajos y plantas leguminosas y suculentas localizadas en las montañas, sobre pendientes rocosas (figura 4). Esta subdivisión fue también nombrada región *Parkinsonia*, *Cylindropuntia* y *Opuntia* por la presencia importante, más que en cualquiera de las otras subdivisiones, de estos tres géneros (Shreve, 1951). Aunque las cactáceas son muy abundantes, uno de los elementos más conspicuos es el saguaro (*Carnegiea gigantea*), que llega a formar densos y extensos bosques de amplia distribución en la región. Porciones de esta subdivisión están representadas en la región oriental de la Reserva de la Biosfera El Pinacate y Gran Desierto de Altar.

Costa Central del Golfo

Presente en ambos lados del Golfo de California, esta subdivisión del Desierto Sonorense es la de menor área en el estado y cubre una extensión aproximada de un millón de hectáreas (figura 2). Conocida como región *Bursera-Jatropha* (Shreve, 1951), esta unidad se distribuye como una estrecha banda a lo largo de la mayor parte de la costa de Sonora (figura 5). Se le considera la tierra tradicional de los comcáac (seris) (Felger y Moser, 1985). También se distribuye en las casi novecientas islas e islotes del Golfo de California, las cuales fueron decretadas en 1978 como Zona de Reserva y Refu-

gio de Aves Migratorias y de la Fauna Silvestre y en 2000 como Área de Protección de Flora y Fauna, además de que desde 1995 fueron incluidas en la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO. La precipitación aquí es muy baja e irregular con una aportación menor de 150 mm anuales y no son raros los años en los que no se registra lluvia, por lo que esta región siempre ha sido muy árida para el desarrollo de la agricultura tradicional. En las partes altas de la Isla del Tiburón y de la sierra del Aguaje al norte de Guaymas, la precipitación es mayor y la vegetación es un matorral espinoso de piedemonte o ecotono entre este matorral y Desierto Sonorense con numerosos elementos subtropicales (Felger y Lowe, 1976; Felger, 1999; Wilder *et al.*, 2007 y 2008). Por su cercanía con el mar, la temperatura anual en las islas es menor que hacia tierra firme. La vegetación de esta subdivisión se define como un desierto crasicalescente abierto de baja productividad (Díaz-Martínez, 2001) dominado por plantas suculentas de tallos gruesos (figura 6), entre los que destacan por su abundancia el cardón o sagüeso *Pachycereus pringlei*, una cactácea columnar de gran porte, y las especies arbóreas *Acacia willardiana*, *Olneya tesota*, *Bursera hindsiana*, *B. microphylla* y las arbustivas *Jatropha cinerea* y *J. cuneata*. Algunas de las especies de árboles presentan troncos característicamente cortos, muy engrosados y de forma irregular. Esta subdivisión sustenta una flora muy diversa, rica en endemismos, especialmente aquellos que se comparten con la península de Baja California, tales como *Fouquieria columnaris* (típica de la subdivisión Vizcaíno), *Euphorbia xanti* y *Stenocereus gummosus*, relictos típicos de Baja California en la costa de Sonora (Felger y Lowe, 1976; Wilder *et al.*, 2007 y 2008).

En su límite con el mar, la vegetación de la Costa Central del Golfo presenta una zona de transición donde prosperan diversas gramíneas, herbáceas perennes, especialmente suculentas, y arbustos que forman una banda bien definida de plantas halófitas (tolerantes a la salinidad) que caracterizan a la vegetación de dunas costeras (Johnson, 1982). En los estuarios abiertos al mar, que en las regiones de-

sérticas son estuarios inversos afectados casi únicamente por las condiciones cambiantes de las mareas, se favorece el establecimiento de distintas especies de mangle que forman un denso y continuo dosel arbóreo a lo largo del estuario (figura 7). La vegetación de los manglares en Sonora está formada de tres especies *Rhizophora mangle* (Rhizophoraceae), *Avicennia germinans* (Acanthaceae) y *Laguncularia racemosa* (Combretaceae) (Felger *et al.*, 2001). Una especie más, *Conocarpus erecta* (Combretaceae), se añade a los manglares del sur de Sonora. Los manglares se distribuyen en los esteros, bahías protegidas y a lo largo de las planicies aluviales que gradualmente se sumergen en el mar. Estos manglares del desierto son de porte bajo, y su dosel normalmente no sobrepasa los cuatro metros de altura. Presentan adaptaciones morfológicas y fisiológicas especiales de resistencia a la salinidad y de respuesta al flujo cambiante del nivel del mar. En esta región del mundo los manglares alcanzan su límite norte de su área de distribución neotropical en el Estero Sargento al norte del Canal del Infiernillo a 29°20'N (Felger y Moser, 1985; Felger *et al.*, 2001; Whitmore *et al.*, 2005).

A pesar de su escasa representación en términos de superficie, los manglares son de importancia extrema por su elevada productividad biológica, por ser un hábitat especial de numerosas especies terrestres y marinas y por su papel fundamental en la protección de la línea de costa. Muchas especies animales encuentran refugio y alimento en los manglares, desde mamíferos que consumen peces e invertebrados, aves que eligen estos ambientes como sitios de anidación (Mellink y De la Riva, 2005), hasta numerosas especies marinas de importancia comercial que pasan algún estadio de su ciclo de vida asociado a los manglares. Esta vegetación, además de su innegable valor estético, presenta un elevado valor económico en lo que respecta a las pesquerías (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2000). A pesar de su importancia ecológica y las medidas de protección, grandes extensiones de manglar han sido transformados en la actualidad para el establecimiento de granjas acuícolas, para desarrollos turísticos o para el cultivo de especies no nativas de mangle.

Planicies de Sonora

Esta subdivisión cubre una extensión aproximada de tres millones de hectáreas localizadas en la parte central de Sonora, entre la faja costera y las montañas de la Sierra Madre Occidental, a una elevación de entre 100 y 750 msnm (figura 2). También nombrada por Shreve (1951) como región *Olneya-Encelia*, presenta una vegetación que se define como un desierto arbosufrutecente dominado por árboles de gran talla, como el palo fierro *Olneya tesota*, el mezquite *Prosopis velutina* y el palo verde *Parkinsonia microphylla*, además de numerosos arbustos como la rama blanca *Encelia farinosa* (figura 8). A una escala espacial de cientos de hectáreas, la estructura de la vegetación cambia de los sitios planos, donde predomina un matorral abierto de escasa cobertura y pocas especies, a los sitios de arroyo, donde el matorral es más diverso y con una mayor densidad, biomasa y productividad de plantas perennes (Martínez-Yrizar *et al.*, 1999; Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006). A pesar de su importancia ecológica, hasta el momento no existe ninguna reserva formal que proteja este ecosistema y que permita enfrentar la fuerte amenaza representada por la creciente invasión de zacate buffel y el desarrollo urbano e industrial. El área cercana al Rancho El Carrizo, al sur de Benjamín Hill, probablemente presenta la mayor diversidad de gramíneas nativas que cualquier otra área del Desierto Sonorense. La densa cubierta del zacate borreguero (*Bouteloua diversispicula* = *Cathastecum brevifolium*) forma un tipo de pastizal desértico único en esta área. Al sur de Guaymas se presenta la transición de esta subdivisión con el matorral espinoso costero y hacia el este y en las montañas con el matorral espinoso de piedemonte. Otra transición se observa en las montañas dentro de esta subdivisión, en las que se desarrolla el matorral espinoso de piedemonte, especialmente en las pendientes orientadas al norte y este con mayor humedad.

Matorral Espinoso

El matorral espinoso (thornscrub) en México es de origen tropical. Es uno de los ecosistemas me-

nos estudiados y más amenazados por actividades antropogénicas. En Sonora, este matorral fue nombrado por Brown (1982) como «Sinaloan thornscrub», aunque de acuerdo con Felger y Lowe (1976) y Búrquez *et al.* (1999), se pueden reconocer dos formaciones distintas: el Matorral Espinoso de Piedemonte y el Matorral Espinoso Costero, cada uno con características florísticas y estructurales propias. En la parte alta de las montañas del Desierto Sonorense, como en la sierra del Aguaje, al norte de San Carlos, y en la sierra Libre, entre Guaymas y Hermosillo, que son como islas del cielo del desierto, la característica más conspicua del matorral espinoso es la presencia de *Lysiloma divaricatum*, la cual forma un denso estrato arbóreo. Es también prominente *Brahea brandegeei*, una especie de palma que forma densas poblaciones en la parte alta de los cerros y acantilados, en los cañones y a lo largo de los principales drenajes de estas sierras. Se han registrado más de 115 especies de árboles del matorral espinoso (Felger *et al.*, 2001).

Matorral Espinoso de Piedemonte

Esta unidad de vegetación fue originalmente clasificada por Shreve (1951) como una de las subdivisiones del Desierto Sonorense con la designación «Foothills of Sonora», pero posteriormente fue separada, por su carácter distinto al desierto, y reclasificada como matorral espinoso (thornscrub) (Felger y Lowe, 1976; Turner y Brown, 1982; Búrquez *et al.*, 1999). Esta unidad se extiende hacia el norte y a lo largo del límite este del Desierto Sonorense y en las laderas de los cerros y sitios de mayor altitud de la subdivisión Planicies de Sonora (figura 9). Es un matorral espinoso arbustivo o semi-arborescente muy diverso de origen tropical, con un dosel casi cerrado (Felger, 2000). Representa la transición entre la vegetación del Desierto Sonorense y el bosque tropical caducifolio del flanco occidental de la Sierra Madre Occidental (Búrquez *et al.*, 1999). De las numerosas especies del matorral destacan por su abundancia: *Acacia russelliana*, *Bursera fagaroides*, *B. laxiflora*, *Cordia sonora*, *Fouquieria macdougalii*, *Haematoxylum brasiletto*, *Ipomoea arborescens*, *Jatropha cordata*, *Lysilo-*

ma divaricatum, *L. watsonii*, *Mimosa distachya* y *Stenocereus thurberi*, entre otras (Búrquez *et al.*, 1999; Felger *et al.*, 2001; Beltrán-Flores, 2006).

Matorral Espinoso Costero

Distribuido al sur del Desierto Sonorense, este matorral fue llamado por Gentry (1942) «thorn forest» para enfatizar la predominancia de *Acacia cochliacantha*, una leguminosa fuertemente armada con gruesas espinas en forma de canoa (Felger *et al.*, 2001). Otras especies típicas del matorral costero son: *Bursera fagaroides*, *Forchhammeria watsonii*, *Guaiacum coulteri*, *Haematoxylum brasiletto*, *Havardia sonora* y *Jacquinia macrocarpa* subsp. *pungens*. De las especies de cactáceas predominan el etcho (*Pachycereus pecten-aboriginum*) y el pitayo (*Stenocereus thurberi*). Esta última especie tiene un amplio rango de distribución en el estado, pero en la región centro y sur presenta las más altas densidades poblacionales y forma una comunidad estructuralmente compleja rica en especies. Por la predominancia de pitayos y su elevada densidad (400 ind. ha⁻¹), «El Pitayal» (figura 10) es el nombre con el que se denomina localmente a este matorral costero que se distribuye en una estrecha banda que cubre decenas de miles de hectáreas en las planicies de la costa del sur de Sonora. A pesar de su importancia ecológica, cultural, económica y social (Bustamante, 2003; Orozco-Urías, 2007; Yetman, 2006), El Pitayal ha sido extensamente transformado, principalmente a agricultura de irrigación y para el establecimiento de granjas acuícolas. Igualmente importantes en esta región son los manglares que, profundamente influenciados por los drenajes de los ríos Yaqui, Mayo y Fuerte, alguna vez fueron los más extensos y densos de Sonora (Felger *et al.*, 2001). La flora y sus relaciones se discuten en detalle en Friedman (1996).

Bosque Tropical Caducifolio

El bosque tropical caducifolio (o «selva baja caducifolia») de Sonora representa el límite norte de su distribución en América aproximadamente a los 28° N (Martínez-Yrizar *et al.*, 2000). Se ubica prin-

principalmente entre el matorral espinoso de piedemonte a baja elevación y la zona de encinares hacia el este a mayor elevación, típicamente entre 250 y 1 200 m de altitud (figura 2). Hacia el norte, sobre el límite este del Desierto Sonorense, el bosque tropical caducifolio se extiende y se mezcla imperceptiblemente con el matorral espinoso de piedemonte. En su condición natural (figura 11), el bosque tropical caducifolio presenta un dosel cerrado de 10 a 15 m de alto, compuesto por una flora de origen tropical muy diversa y con cambios estructurales claramente relacionados con la variabilidad topográfica y las condiciones edáficas (Martínez-Yrizar *et al.*, 2000; Felger *et al.*, 2001; Varela-Espinosa, 2005).

De acuerdo con Yetman *et al.* (1995), dos características sobresalientes de este bosque en Sonora son la presencia y alta densidad de mauto, *Lysiloma divaricatum*, y la alta diversidad y abundancia de individuos del género *Bursera* (ocho especies). Un rasgo interesante es la presencia de encinos a muy baja elevación (hasta 200 m) con dominancia de *Q. albocincta*, *Q. chihuahuensis* y *Q. tuberculata*, pero restringidos dentro del bosque tropical caducifolio a zonas con suelos ácidos alterados por acción hidrotermal, en donde forman un peculiar mosaico de vegetación (figura 12) (Gentry, 1942; Goldberg, 1982; Martin *et al.*, 1998). Otra característica sobresaliente es la presencia de vegetación ribereña en el fondo de los cañones y a lo largo de los arroyos, los cuales actúan como corredores de intrusiones de la vegetación adyacente (Felger *et al.*, 2001). En estas condiciones de humedad extra se favorece el establecimiento de orquídeas tropicales epífitas y saxícolas (Felger y Dimmitt, 1998). Se han registrado más de ciento cincuenta especies de árboles en el bosque tropical caducifolio de Sonora (Felger *et al.*, 2001). Ejemplares de géneros importantes incluyen a *Bursera*, *Ceiba*, *Chloroleucon*, *Conzattia*, *Ficus*, *Haematoxylum*, *Lonchocarpus*, *Lysiloma* y *Tabebuia*. Por su importancia en términos de la distribución geográfica del bosque tropical caducifolio en México, la Sierra de Alamos-Río Cuchujaqui fue decretada en 1996 como Área de Protección de Flora y Fau-

na Silvestre y Acuática, a fin de salvaguardar una extensa área de bosque tropical caducifolio en Sonora. En 2007, esta reserva fue incorporada a la Red Mundial de Reservas de Biosfera de la UNESCO. Van Devender *et al.* (2000) presentan una descripción de la vegetación y de la flora rica en especies del bosque a lo largo del río Cuchujaqui, el tributario más norteño del río Fuerte.

Bosque Madreño

Agrupar a los bosques templados, principalmente a los encinares, los bosques de pino-encino y los bosques de coníferas (figuras 13 a 16). Típicamente se desarrollan en las zonas frías en lo alto de la Sierra Madre Occidental, en un mosaico de condiciones edáficas, desde suelos profundos, ricos en materia orgánica, hasta litosoles someros y muy pedregosos. Son comunidades arbóreas con una flora distintiva rica en especies endémicas. Localmente, las plantas herbáceas (anuales y perennes) llegan a formar un denso y variado sotobosque con afinidades con la flora del Eje Neovolcánico. Las gramíneas presentan numerosos elementos que se comparan con la flora de otras regiones bióticas (Van Devender *et al.*, 2005). Los pinos, representados por 11 especies, son muy importantes en esta región y aportan más del veinte por ciento del total de las especies de pinos en México y América Central (Farjon y Styles, 1997; Farjon *et al.*, 1997). En su conjunto, el bosque madreño alberga 25 especies de *Quercus* que constituyen el género más diverso de árboles de Sonora (Felger *et al.*, 2001).

Encinar

El encinar es una comunidad arbórea ampliamente distribuida en Sonora a elevaciones por arriba del desierto, los pastizales y el bosque tropical caducifolio, pero a menor elevación que los bosques de pino-encino y de coníferas, con los que forma amplios ecotonos (Felger *et al.*, 2001; Van Devender *et al.*, 2005). Los encinares de Sonora son altamente variables en composición y estructura. En el límite inferior de su distribución contienen numerosos elementos de afinidad tropical, mientras

que los elementos neárticos son más importantes a mayor elevación (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006). Extensas áreas del noreste y norte-centro de Sonora están dominadas por encinares abiertos de *Q. emoryi* (figura 13). Esta especie, junto con *Q. arizonica* y *Q. oblongifolia*, son las principales especies de baja elevación en el norte del estado. Hacia el sureste y este-centro de su área de distribución, los encinares forman estrechas bandas entre el bosque tropical caducifolio y los bosques de pino-encino (Felger *et al.*, 2001). Dos especies de encino, *Q. chihuahuensis* y *Q. tuberculata*, se encuentran frecuentemente dispersos entre los árboles del bosque tropical caducifolio, pero su densidad aumenta a partir de los 900 m de elevación, en donde, al ser más cerrado, forma un dosel más típico del encinar (figura 14).

Bosque de Pino-Encino

En las montañas del este de Sonora, entre 1 200 y 2 240 m de elevación, se localizan extensas áreas de bosque de pino-encino incluidas por Brown (1982) dentro de la denominación «Bosque Perennifolio Madrense». En los sitios de mayor altitud aumenta la abundancia de pinos, rasgo que distingue al bosque de pino-encino del bosque de pino *per se*, aunque en términos prácticos es difícil separarlos en las discusiones sobre patrones de distribución de las plantas (figura 15) (Felger *et al.*, 2001). El bosque de pino es también llamado por Brown (1982) «Bosque de Coníferas de Montaña Madrense». La mayor extensión del bosque de pino-encino se presenta en el este de Sonora, a lo largo del flanco occidental de Chihuahua. Estos bosques son similares de norte a sur en estructura, pero se observa una gradual introducción de especies más tropicales y de distribución sur que reemplazan a las especies templadas del norte. Las zonas sureñas albergan una flora diversa con numerosos elementos subtropicales como *Pinus herrerae*, *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. yecorensis*. Especies norteñas de pino y encino incluyen a *P. arizonica* y *P. engelmannii*, *Q. emoryi*, *Q. gambellii* y *Q. hypoleucoides*, mientras que los encinos «tropicales» son más diversos e incluyen a *Q. albocincta*, *Q. coccolobifolia*,

Q. viminea y a la especie de hojas espectaculares, por su gran tamaño, *Q. tarahumara* (Felger *et al.*, 2001). A menor elevación hacia el sur se encuentran frecuentemente encinos tropicales asociados a los pinos (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006).

Bosque Mixto de Coníferas

Se ubican en las partes de mayor elevación (>2 100 m) en las montañas de la Sierra Madre Occidental de Sonora, donde se ha reportado la presencia de 13 especies de coníferas, con tres géneros (*Abies*, *Pinus* y *Pseudotsuga*) que definen a este tipo de bosque (figura 16) (Felger *et al.*, 2001). El estudio científico de los bosques mixtos de coníferas, y en general del bosque madrense, es limitado, y aunque existen descripciones florísticas y taxonómicas que destacan la importancia de la región de la sierra de Sonora en términos de la riqueza de especies, no hay estudios a nivel de ecosistema con información sobre las tasas de productividad, almacenamiento de carbono y flujos de nutrientes en la variedad de ambientes en los que se desarrollan las especies que caracterizan a estos bosques.

Pastizal de Altura

El área más extensa de pastizal de altura en Sonora se ubica en los valles y serranías de la región noreste, donde las temperaturas de congelación son comunes (figura 17). Se le encuentra a elevaciones por arriba del desierto y los matorrales y rodeado, entre los 1 050 y 1 700 m de elevación, por los bosques de encino y de pino-encino (Van Devender *et al.*, 2005), con los que mantiene una estrecha relación (McClaran y Van Devender, 1995). La flora de pastos es muy diversa e incluye distintas gramíneas perennes y anuales, dominantes o codominantes (Van Devender *et al.*, 2005). Las especies de la familia Asteraceae pueden llegar a ser muy comunes, junto con otras herbáceas y arbustos que prevalecen en áreas circundantes y en casi todo Sonora, excepto en las áreas del bosque tropical caducifolio (Búrquez *et al.*, 1998).

Dos subdivisiones naturales de pastizal pueden reconocerse en Sonora. Uno es un distintivo pasti-

zal frío-templado y el otro un pastizal desértico. El primero es un representante sureño distante de la región de los pastizales de las grandes planicies («plains grasslands») presente hasta la frontera de México en el noreste de Sonora como una extensión sureña del valle de las Ánimas al oeste de la sierra San Luis y una vasta área al sur de Naco y cerca de Cananea. Entre las especies que destacan por su abundancia, se encuentran *Aristida*, *Bouteloua*, *Digitaria*, *Eragrostis*, *Leptochloa*, *Lycurus*, *Muhlenbergia*, *Panicum*, *Paspalum*, *Schizachyrium*, *Setaria* y *Sporobolus*. Los árboles y los arbustos en esta comunidad son escasos y la flora de plantas leñosas está casi restringida a los arroyos y áreas de drenaje superficial (Felger *et al.*, 2001). En esta misma localidad, en los ranchos El Valle y Cuenca los Ojos en el valle de las Ánimas, se puede reconocer un pastizal frío-templado dominado por *Nolina texana* (figura 18), no registrado antes más allá del este de Coahuila (Van Devender, 2008, com. per.). A baja elevación hacia el sur, pero aún dentro de la región noreste y norte-centro del estado, se presentan áreas aisladas del pastizal desértico. Entre las especies características de gramíneas que conforman este pastizal destacan *Aristida*, *Bouteloua*, *Eragrostis*, *Hilaria*, *Muhlenbergia*, *Panicum*, *Sporobolus* y *Tridens*. La presencia de plantas leñosas es natural, pero la dominancia de gramíneas o de arbustos puede bien ser el reflejo de regímenes climáticos o de disturbio (Van Devender, 1995).

Desierto Chihuahuense

Una importante área de este gran desierto continental, localizado en el norte-centro de México entre la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre Occidental, se extiende hacia el noroeste de Sonora a elevaciones de <1 430 m, flanqueado en sus fronteras por el pastizal y el encinar y por el matorral de piedemonte hacia el sur (figura 19). Representado por pocas especies de árboles en Sonora (18 especies), presenta un dosel abierto donde predominan los arbustos, principalmente *Acacia neovernicosa*, *Flourensia cernua*, *Larrea divaricata*, *Prosopis glandulosa* var. *torreyana* y *P. velutina*. La ve-

getación del Desierto Chihuahuense presenta su óptimo en suelos de piedra caliza, los cuales favorecen el desarrollo de la comunidad de desierto en lugar del pastizal.

Pastizal de Zacate Buffel

El zacate buffel, *Pennisetum ciliare*, es una gramínea exótica que crece en Sonora en sitios de clima cálido, libre de heladas fuertes, en un rango de precipitación entre 150 y 600 mm anuales, concentrada en el verano y sin clara preferencia a un tipo de suelo. A *P. ciliare* se le puede encontrar en todos los caminos principales y vecinales de Sonora, desde el nivel del mar y en el desierto extremo al oeste de El Pinacate (Felger, 2000), en los pastizales y bosques templados a lo largo de la carretera federal 2 al este de Agua Prieta y hasta 1 610 m de elevación (Van Devender, 2007, com. per.). Desde su introducción al estado en los años sesenta, más de ochocientas mil hectáreas han sido plantadas con buffel, lo que ha convertido al desierto en un monótono pastizal estructuralmente simple (figura 20). Aunque esta conversión beneficia inicialmente a los rancheros, la colonización del buffel ha sido muy exitosa fuera de los ranchos, lo cual ha ocasionado cambios significativos en la estructura y funcionamiento del desierto y matorrales, además de las consecuencias asociadas a la pérdida de biodiversidad y productividad ya señaladas por distintos autores (Búrquez *et al.*, 1998; Esque *et al.*, 2002; Franklin *et al.*, 2006; Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006).

ESTUDIOS ECOSISTÉMICOS EN SONORA

La vegetación, la flora, la fauna y el ambiente físico establecen complejas relaciones funcionales a nivel del ecosistema. Son muy contados los estudios que han documentado la dinámica funcional de los ecosistemas de Sonora (Búrquez *et al.*, 1999; Martínez-Yrizar *et al.*, 2000; Franklin *et al.*, 2006; Gebremichael y Barros, 2006; Martínez-Yrizar *et al.*, 2007). Se sabe que la productividad primaria en

el Desierto Sonorense aumenta en dirección oeste-este en relación con el aumento de precipitación en ese gradiente y de las planicies costeras a las laderas de los cerros principalmente con orientación norte. Sin embargo, mucha de la variación temporal y espacial en productividad está asociada a condiciones específicas de captación de agua debidas a la topografía y a la variabilidad interanual de precipitación, que son muy altas en esta región desértica del país (Búrquez *et al.*, 1999; Martínez-Yrizar *et al.*, 1999; Díaz-Martínez, 2001). Las tasas a las que ocurre otros procesos funcionales como la descomposición de la materia orgánica y el potencial microbiano del suelo también están fuertemente influenciadas por las condiciones particulares del hábitat, aunque la calidad de los residuos orgánicos, principalmente el contenido de lignina, también es un factor determinante en la velocidad de incorporación de los nutrimentos al suelo (Núñez *et al.*, 2001; Martínez-Yrizar *et al.*, 2007). Hacia la sierra, los estudios del funcionamiento del bosque tropical caducifolio muestran que la producción de hojarasca, que es usada como un índice de productividad primaria neta, es baja en esta región, la cual marca el límite norte de la distribución del bosque tropical caducifolio en América, en comparación con los bosques situados hacia el sur en la costa del Pacífico mexicano (Martínez-Yrizar *et al.*, 2000). Sin embargo, la fitomasa aérea se ubica dentro del rango de valores reportado para otros bosques de este tipo ubicados en el neotrópico (Álvarez-Yépez *et al.*, 2008). No existen estudios a nivel de ecosistema de los mezquites, de los ecosistemas ribereños y oasis del desierto y otros humedales costeros, a pesar del papel del agua como el principal factor limitante de su funcionamiento. Tampoco existe información de procesos funcionales del ecosistema para el bosque madrense, no obstante su papel regulador en el ciclo hidrológico a escala regional.

VALOR DE LOS ECOSISTEMAS DE SONORA

Como se mencionó anteriormente, se conoce con cierto nivel de detalle la vegetación de distintas

regiones del estado, pero para la mayoría de los ecosistemas de Sonora no existen datos sobre su estructura y funcionamiento, aun considerando que algunos de ellos, como los encinares, los bosques de pino-encino y los bosques de coníferas, son sistemas con gran influencia en la dinámica del desierto circundante (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006). La información de procesos a nivel de ecosistema es necesaria para: 1) cuantificar los servicios ecosistémicos e identificar su relación con el bienestar humano, 2) analizar la capacidad y los patrones espaciales de cada ecosistema para ofrecer dichos servicios, 3) definir qué regiones son críticas para la conservación por la provisión de los distintos servicios que la población obtiene en la actualidad y, 4) medir el cambio en la provisión de los servicios ecosistémicos por cambio de uso de suelo (WSTB, 2004; Metzger *et al.*, 2006).

Con base en diversos estudios ecológicos y etnobotánicos realizados en distintas regiones del estado (Felger y Moser, 1985; Reina-Guerrero, 1993; Bañuelos y Búrquez, 1996; Búrquez *et al.*, 1998 y 1999; Martínez-Yrizar *et al.*, 1999 y 2007; Yetman *et al.*, 2000; Núñez *et al.*, 2001; Díaz-Martínez, 2001; Yetman y Felger, 2002; Bustamante, 2003; Varela-Espinosa, 2005; Beltrán-Flores, 2006; Luque-Agraz y Robles-Torres, 2006; Felger, 2007; Orozco-Urías, 2007) y el conocimiento sobre procesos en ecosistemas análogos a los de Sonora, diseñamos un criterio de evaluación para estimar el valor relativo de distintos servicios clave que, en ausencia de disturbio antrópico, ofrecen los ecosistemas de Sonora descritos en este capítulo (tabla 2). Esta evaluación muestra que la capacidad para proveer servicios varía de un tipo de ecosistema a otro. También se observa que existe un aumento gradual en el valor total de los servicios de soporte y regulación y de los servicios de provisión conforme cambia el gradiente ambiental, con los valores totales más altos situados en las comunidades dominadas por árboles. En el caso particular del nuevo ecosistema de Sonora, el pastizal de zacate buffel, su contribución relativa en prácticamente todos los servicios es muy pequeña en comparación con los ecosistemas nativos. Sin em-

Tabla 2. Valor relativo de los ecosistemas terrestres de Sonora en términos de la capacidad para proveer distintos tipos de bienes y servicios de beneficio a la sociedad.
(Escala: 0 = nulo; 1 a 4 de menor a mayor importancia regional)

Servicios ecosistémicos	Valle del Bajo Río Colorado	Altiplano de Arizona	Costa Central del Golfo	Planicies de Sonora	Matorral Esp. de Piedemonte	Matorral Espinoso Costero	Bosque Tropical Caducifolio	Bosque Madreño	Pastizal de Altura	Desierto Chihuahuense	Pastizal de Buffel
Servicios de soporte y regulación											
Almacenamiento de carbono	1	2	3	3	3	3	4	4	1	2	1
Control de inundaciones	2	3	2	3	3	3	4	4	3	3	2
Control de erosión	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	1
Captación de agua	1	1	1	2	3	2	4	4	1	2	1
Recarga de acuíferos	1	2	2	3	3	4	4	4	3	2	0
Regulación calidad del aire	3	3	3	3	4	3	4	4	2	2	1
Acervo de recursos genéticos	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1
Provisión de polinizadores	2	4	4	4	4	4	4	4	2	4	0
Regeneración fertilidad del suelo	2	2	2	2	3	3	4	4	3	2	1
Total	20	25	25	28	31	30	36	36	21	24	8
Servicios de provisión											
Abastecimiento de agua	1	2	2	2	3	3	3	4	3	2	0
Recursos forestales	1	2	3	3	3	3	4	4	1	2	0
Recursos de vida silvestre	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1
Recursos medicinales	2	3	3	3	3	3	4	3	1	2	0
Recursos forrajeros	1	2	1	3	3	3	3	4	4	3	4
Total	9	13	13	15	16	16	18	19	13	13	5
Servicios culturales											
Belleza escénica	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	0
Conocimiento tradicional	2	4	4	3	4	4	4	4	1	4	0
Inspiración intelectual	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	0
Recreación	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0
Total	14	16	16	15	16	16	16	16	9	16	0

bargo, en términos de la provisión de recursos forrajeros, los pastizales inducidos de buffel destacan por su alto valor, pero sólo si se trata de pastizales en óptimas condiciones de manejo o que reciben altos insumos para mantener su productividad. En la práctica, no obstante, numerosos pastizales de

zacate buffel están sometidos a sobrepastoreo, por lo que muestran un evidente deterioro y pérdida de su capacidad productiva (Búrquez *et al.*, 1998).

Considerando los problemas cada vez más recurrentes de escasez de agua en esta región del país (Moreno-Vázquez, 2006), resulta obvio que los eco-

sistemas del noroeste de México con el mayor valor en términos de la provisión de agua y otros servicios de regulación y soporte sean los bosques tropicales y templados de la Sierra Madre Occidental. No sólo por su papel en la captación de agua, sino también por su influencia en la dinámica de los ecosistemas al pie de las montañas y en los valles, la protección y el estudio integral de estos bosques y de las principales cuencas hidrográficas de Sonora es un asunto prioritario que ya debería haber superado la etapa de discusión en la política ambiental y contar con medidas efectivas de protección, mitigación, restauración y aprovechamiento sostenible.

Por su importancia regional como reservorios de carbono y recursos genéticos, así como en el control de la erosión, en la purificación del aire y en la recarga de los acuíferos, los ecosistemas de la costa también deberían contar con estrictas medidas de protección y planes de manejo que respeten los programas de ordenamiento territorial en esta zona. Estos ecosistemas incluyen a los humedales costeros que proveen servicios ecosistémicos de muy alto valor comercial (WSTB, 2004). A pesar de su importancia económica y social, los humedales (en particular los manglares) y la vegetación de las planicies costeras de Sonora han sido transformados principalmente en granjas camaronícolas a una tasa elevada, sin tomar en cuenta que son hábitats críticos para numerosas especies de aves migratorias y elementos esenciales en la dinámica ecológica y el entorno cultural de la línea de costa (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2000; Felger *et al.*, 2001; Luque-Agraz y Robles-Torres, 2006).

AGENTES DE ALTERACIÓN DE LOS ECOSISTEMAS DE SONORA Y ACCIONES FUTURAS

Como en numerosas partes de México y del mundo, la biodiversidad y la integridad funcional de los ecosistemas del noroeste de México están fuertemente amenazadas por el acelerado crecimiento demográfico y el impacto derivado de las actividades humanas (Stoleson *et al.*, 2005). Los principa-

les agentes directos de cambio antropogénico en los ambientes terrestres de Sonora han sido la agricultura, la ganadería, la extracción forestal, la minería y el desarrollo urbano (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2007). Entre estas actividades productivas destaca la ganadería de bovinos, la cual ha sido una industria tradicional en la región. Los desmontes para la siembra de zacate buffel han introducido un ciclo de pasto-fuego ajeno a la dinámica ecológica del desierto y otras comunidades nativas (Búrquez *et al.*, 2002). Esta especie ha sido capaz de dispersarse y establecerse exitosamente, de forma especial en áreas de intenso pastoreo (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2006; Franklin *et al.*, 2006). Su invasión en tan corto tiempo ha generado un paisaje altamente fragmentado, particularmente en la subdivisión Planicies de Sonora del Desierto Sonorense, lo que ha alterado considerablemente la estructura y dinámica funcional del desierto (figura 21). El pastoreo, la extracción de vara y el corte de leña son prácticas de aprovechamiento comunes en los ecosistemas de Sonora (Lindquist, 2000). Este tipo de disturbio, considerado crónico, puede ser tan destructivo a largo plazo como cualquier tipo de disturbio catastrófico como el desmonte (Álvarez-Yépiz *et al.*, 2008). Desafortunadamente, las actividades extractivas y el cambio de uso de suelo en la región no han sido contrarrestadas con suficientes acciones efectivas de protección ambiental, ni con medidas de apoyo permanente a programas para mejorar el manejo de las áreas protegidas y evitar mayores pérdidas, ni con esquemas que enlacen estas áreas y las de creación reciente para formar corredores biológicos que mantengan la dinámica funcional de los ecosistemas de Sonora a gran escala.

La urgente recomendación de ampliar el sistema de áreas naturales en el estado de Sonora, señalada durante muchos años como una solución importante de conservación de la biodiversidad y protección de los servicios ecosistémicos (Búrquez y Martínez-Yrizar, 1992; Felger *et al.*, 2007a), sigue siendo prácticamente ignorada por los tomadores de decisiones. En su lugar, y a expensas del capital natural de Sonora, se han impulsado grandes pro-

yectos de inversión para el desarrollo turístico en la costa, y se ha continuado con el apoyo a la explotación minera, a la ganadería intensiva y a la agricultura de irrigación (Búrquez y Martínez-Yrizar, 2007). Asimismo, nuevas iniciativas para impulsar el desarrollo económico de la región incluyen la apertura de granjas para la producción de combustibles «limpios» (biodiesel) a través de procesos que involucran la transformación y afectación de cientos de miles de hectáreas de desierto costero y manglar, sin tomar en cuenta la importancia vital del mantenimiento de la biodiversidad y los servicios culturales, de provisión y de regulación asociados a ésta (Balvanera *et al.*, 2001).

La diversidad e integridad de los principales ecosistemas terrestres y acuáticos de Sonora están en alto riesgo y se piensa que su destino se definirá en la próxima década (Cartron *et al.*, 2005). Una visión pesimista para esta región de México es que vastas áreas desaparecerán mientras las acciones para cubrir las necesidades de espacio y recursos, principalmente de agua, para una población en acelerado crecimiento, no sean superadas con acciones orientadas a la conservación, mitigación, restauración y manejo sostenible de sus ecosistemas (Cartron *et al.*, 2005; Carpenter *et al.*, 2006; Búrquez y Martínez-Yrizar, 2007; Felger *et al.*, 2007a).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Baruk Maldonado su apoyo técnico en la estimación y delimitación de las áreas de las subdivisiones del Desierto Sonorense en Sonora. A Juan Carlos Álvarez, Enriquena Bustamante, Martha Marina Gómez, Cynthia Lindquist, Jesús Sánchez, Benjamin Wilder y David Yetman, por las enriquecedoras discusiones e ideas relacionadas con el uso, manejo y conservación de los ecosistemas de Sonora.

LITERATURA CITADA

ÁLVAREZ-YÉPIZ, J.C., A. MARTÍNEZ-YRÍZAR, A. BÚRQUEZ

- y C. LINDQUIST. 2008. Variation in Vegetation Structure and Soil Properties Related to Land Use History of Old-Growth and Secondary Forests in Northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management* 256: 355-366.
- BALVANERA, P., G.C. DAILY, P.R. EHRLICH, T.H. RICKETTS, S-A. BAILEY, S. KARK, C. KREMEN y H. PEREIRA. 2001. Conserving Biodiversity and Ecosystem Services. *Science* 291: 2047.
- BAÑUELOS, N. y A. BÚRQUEZ. 1996. Las plantas: una estrategia de salud en la medicina doméstica mayo. *Estudios Sociales* vi (12): 163-189.
- BELTRÁN-FLORES, E. 2006. Efecto de ladera en la composición y estructura de un matorral de piedemonte en el Desierto Sonorense. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- BORMANN, F.H. y G.E. LIKENS. 1979. *Patterns and Process in a Forested Ecosystem*. Springer-Verlag, Nueva York.
- BROWN, D. E., ed. 1982. *Biotic Communities of the American Southwest-United States and Mexico*. Desert Plants. Special Issue, vol. 4, núm. 1-4.
- BÚRQUEZ, A., A. MARTÍNEZ-YRÍZAR, M.E. MILLER, K. ROJAS, M.A. QUINTANA, D. YETMAN. 1998. Mexican Grasslands and the Changing Aridlands of Mexico: An Overview and a Case Study in Northwestern Mexico. En: B. Tellman, D. Finch, C. Edminster y R. Hamre, eds. *The Future of Arid Grasslands: Identifying Issues Seeking Solutions*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station, RMRS-P3, Fort Collins, Colorado, pp. 21-32.
- BÚRQUEZ, A., A. MARTÍNEZ-YRÍZAR, R.S. FELGER y D. YETMAN. 1999. Vegetation and Habitat Diversity at the Southern Edge of the Sonoran Desert. En: R.H. Robichaux, ed. *Ecology of Sonoran Desert Plants and Plant Communities*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, EE. UU., pp. 36-67.
- BÚRQUEZ, A., A. MARTÍNEZ-YRÍZAR y P.S. MARTIN. 1992. From the High Sierra Madre to the Coast: Changes in Vegetation along Highway 16, Maycoba-Hermosillo. En: K.F. Clark, J. Roldán-Quintana y R.H. Schmidt, eds. *Geology and Mineral Resources of Northern Sierra Madre Occidental, Mexico*. Guidebook for the field conference, El Paso Geological Society, El Paso, Texas, pp. 239-252.
- BÚRQUEZ, A., M. MILLER, A. MARTÍNEZ-YRÍZAR. 2002. Mexican Grasslands, Thornscurub and the Transformation of the Sonoran Desert by Invasive Exotic

- Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) En: B. Tellman, ed. *Invasive Species in Sonoran Desert Communities*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 126-146.
- BÚRQUEZ A. y A. MARTÍNEZ-YRÍZAR. 1992. La necesidad de crear reservas ecológicas en el estado de Sonora. En: J.L. Moreno, ed. *Ecología, recursos naturales y medio ambiente en Sonora*. Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología/El Colegio de Sonora. Hermosillo, Sonora, México, pp. 39-46.
- BÚRQUEZ, A. y A. MARTÍNEZ-YRÍZAR. 2000. El desarrollo económico y la conservación de los recursos naturales. En: I. Almada Bay, ed. *Sonora 2000 a debate: problemas y soluciones, riesgos y oportunidades*. Cal y Arena, México, pp. 267-334.
- BÚRQUEZ, A. y A. MARTÍNEZ-YRÍZAR. 2006. Conservación, transformación del paisaje y biodiversidad en el noroeste de México. En: K. Oyama, A. Castillo, eds. *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México*. Siglo XXI/UNAM, México, pp. 85-110.
- BÚRQUEZ, A. y A. MARTÍNEZ-YRÍZAR. 2007. Conservation and Landscape Transformation in Northwestern Mexico. En: R.S. Felger y B. Broyles, eds. *Dry borders: Great Natural Reserves of the Sonoran Desert*. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, pp. 537-547.
- BUSTAMANTE, E. 2003. Variación espacial y temporal en la reproducción y estructura poblacional de *Stenocereus thurberi*: una cactácea columnar del matorral costero al sur de Sonora, México. Tesis de maestría, Instituto de Ecología, UNAM, México.
- CARPENTER, S.R., R. DEFRIES, T. DIETZ, H.A. MOONEY, S. POLANSKY, W.V. REID y R.J. SCHOLLES. 2006. Millennium Ecosystem Assessment: research needs. *Science* 314: 257-258.
- CARTRON J-L.E., G. CEBALLOS, R.S. FELGER. 2005. Biodiversity, Ecosystems, and Conservation: Prospects for Northern Mexico. En: J-L.E. Cartron, G. Ceballos y R.S. Felger, eds. *Biodiversity, Ecosystems, and Conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, Nueva York, pp. 3-7.
- CASTILLO, A. 2006. Generación, comunicación y utilización de conocimiento científico para el manejo de los ecosistemas en México. En: K. Oyama, A. Castillo, eds. *Manejo, conservación y restauración de recursos naturales en México*. Siglo XXI/UNAM, México, pp. 341-361.
- CHAPIN III, F.S., P.A. MATSON y H.A. MOONEY. 2002. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, Nueva York.
- 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 y M. VAN DEN BELT. 1997. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature* 387: 253-260.
- DAILY, G.C. 1997a. Introduction: What are ecosystem services? En: G. Daily, ed. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, D.C., pp. 1-10.
- DAILY, G.C. 1997b. Valuing and safeguarding Earth's life support systems. G. Daily, ed. *Natures Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, D.C., pp. 365-374.
- DAILY, G.C., S. ALEXANDER, P.R. EHRLICH, L. GOULDER, J. LUBCHENCO, P.A. MATSON, H.A. MOONEY, S. POSTEL, S.H. SCHNEIDER, D. TILMAN y G.M. WOODWELL. 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology* 2: 1-16.
- DEFRIES, R.S., J.A. FOLEY y G.P. ASNER. 2004. Land-Use Choices: Balancing Human Needs and Ecosystem Function. *Frontiers in Ecology and Environment* 2: 249-257.
- DÍAZ-MARTÍNEZ, A.M. 2001. Variación espacial y temporal de la producción de hojarasca en la subdivisión Costa Central del Golfo del Desierto Sonorense, en Sonora, México. Tesis de licenciatura, Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora, México.
- DIETZ, T., E.A. ROSA y R. YORK. 2007. Driving Ecological Footprint. *Frontiers in Ecology and Environment* 5: 13-18.
- ESQUE, T.C., A. BÚRQUEZ, C.R. SCHWALBE, T.R. VAN DEVENDER, P.J. ANNING y M.J. NIJHUIS. 2002. Fire Ecology of Sonoran Desert Tortoises. Effects of Fire on Desert Tortoises and their Habitats. En: T.R. Van Devender, ed. *Ecology and Conservation of Sonoran Desert Tortoises*. University of Arizona Press. Tucson, Arizona, pp. 312-333.
- EZCURRA, E., M. EQUIHUA y J. LÓPEZ-PORTILLO. 1987. The Desert Vegetation of El Pinacate, Sonora, Mexico. *Vegetatio* 71: 49-60.
- EZCURRA, E., R.S. FELGER, A. RUSSELL y M. EQUIHUA. 1988. Freshwater Islands in a Desert Sand Sea: The Hydrology, Flora, and Phytogeography of the Gran Desierto Oases of Northwestern Mexico. *Desert Plants* 9: 35-44 y 55-63.

- EZCURRA, E. y V. RODRÍGUES. 1986. Rainfall Patterns in the Gran Desierto, Sonora, Mexico. *Journal of Arid Environments* 10: 13-28.
- FARJON, A., J.A. PÉREZ DE LA ROSA y B.T. STYLES. 1997. A Field Guide to the Pines of Mexico and Central America. Kew. *Royal Botanic Gardens*.
- FARJON, A. y B.T. STYLES. 1997. *Pinus* (Pinaceae) *Flora Neotropica Monograph* 75.
- FELGER, R.S. 1980. Vegetation and Flora of the Gran Desierto, Sonora, Mexico. *Desert Plants* 2: 87-114.
- FELGER, R.S. 1999. *The Flora of Cañon de Nacapule: A Desert-Bounded Tropical Canyon near Guaymas, Sonora, Mexico*. Proceedings of the San Diego Society of Natural History, núm. 35, 42 p.
- FELGER, R.S. 2000. *Flora of the Gran Desierto and Río Colorado of Northwestern Mexico*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- FELGER, R.S. 2007. Living Resources at the Center of the Sonoran Desert: Native American Plant and Animal Utilization. En: R.S. Felger y B. Broyles, eds. *Dry Borders: Great Natural Reserves of the Sonoran Desert*. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, pp. 147-192.
- FELGER, R.S., B. BROYLES, M.F. WILSON, G.P. NABHAN, D.L. TURNER. 2007a. Six Grand Reserves, one Grand desert. En: R.S. Felger, B. Broyles, eds. *Dry borders: Great Natural Reserves of the Sonoran Desert*. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, pp. 3-26.
- FELGER, R.S., M.B. JOHNSON y M.F. WILSON. 2001. *Trees of Sonora, Mexico*. Oxford University Press, Nueva York.
- FELGER, R.S., S. RUTMAN, M.F. WILSON y K. MAUZ. 2007b. Botanical Diversity of Southern Arizona and Northwestern Sonora. En: R.S. Felger y B. Broyles, eds. *Dry borders: Great Natural Reserves of the Sonoran Desert*. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, pp. 202-271.
- FELGER, R.S. y C.H. LOWE. 1976. The Island and Coastal Vegetation and Flora of the Gulf of California, Mexico. Natural History Museum of Los Angeles County. *Contributions in Science* 285: 1-59.
- FELGER, R.S. y M.A. DIMMITT. 1998. Orchidaceae. En: P.S. Martin, D. Yetman, M. Fishbein, P. Jenkins, T.R. Van Devender y R.K. Wilson, eds. *Gentry's Río Mayo plants. The Tropical Deciduous Forest and Environs of Northwest Mexico*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp 492-498.
- FELGER, R.S. y M.B. MOSER. 1985. *People of the Desert and Sea: Ethnobotany of the Seri Indians*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- FRANKLIN, K.A., K. LYONS, P.L. NAGLER, D. LAMPKIN, E.P. GLENN, F.E. MOLINA-FREANER, T. MARKOW y A.R. HUETE. 2006. Buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) Land Conversion and Productivity in the Plains of Sonora, Mexico. *Biological Conservation* 127: 62-71.
- FRIEDMAN, S.L. 1996. Vegetation and Flora of the Coastal Plains of the Río Mayo Region, Southern Sonora, México. Masters Thesis. Arizona State University, Tempe, Arizona.
- GEBREMICHAEL, M., A.P. BARROS. 2006. Evaluation of MODIS Gross Primary Productivity (GPP) in Tropical Monsoon Regions. *Remote Sensing of Environment* 100: 150-156.
- GENTRY, H.S. 1942. *Río Mayo Plants. A Study of the Flora and Vegetation of the Valley of the Río Mayo in Sonora*. Carnegie Institution of Washington, publication No. 527. Washington, D.C.
- GOLDBERG, D.E. 1982. The Distribution of Evergreen and Deciduous Trees Relative to Soil Type: An Example from the Sierra Madre Mexico, and a General Model. *Ecology* 63: 942-951.
- HABERL, H., K.H. ERB, F. KRAUSMANN, V. GAUBE, A. BONDEAU, Ch. PLUTZAR, S. GINGRICH, W. LUCHT y M. FISCHER-KOWALSKI. 2007. Quantifying and Mapping the Human Appropriation of net Primary Production in Earth's Terrestrial Ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 12942-12945.
- JOHNSON, A.N. 1982. Dune Vegetation along the Eastern Shore of the Gulf of California. *Journal of Biogeography* 9: 317-330.
- LINDQUIST, C.A. 2000. Dimensions of Sustainability: The Use of Vara Blanca as a Natural Resource in the Tropical Deciduous Forest of Sonora, Mexico. Tesis doctoral, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- LUQUE-AGRAZ, D. y A. ROBLES-TORRES. 2006. *Naturalezas, saberes y territorios comcaac (seri)* INE-Semarnat/CIAD, México.
- MA (Millennium Ecosystem Assessment) 2005. *Ecosystems and Human Well Being: Synthesis Report*. Island Press, Washington, D.C.
- MARSHALL, J.T. 1957. *Birds of the Pine-Oak Woodland in Southern Arizona and Adjacent México*. Cooper Ornithological Society, Berkeley, California.
- MARTIN, P.S., D. YETMAN, M. FISHBEIN, P. JENKINS, T.R. Van Devender y R.K. Wilson. 1998. *Gentry's Río Ma-*

- yo Plants: The Tropical Deciduous Forest and Environs of Northwest Mexico*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- MARTÍNEZ-YRÍZAR, A., A. BÚRQUEZ, S. NÚÑEZ y H. MIRANDA. 1999. Temporal and Spatial Variation of Litter Production in Sonoran Desert Communities. *Plant Ecology* 145: 37-48.
- MARTÍNEZ-YRÍZAR, A., M. MAASS y A. BÚRQUEZ. 2000. Structure and Functioning of Tropical Deciduous Forest in Western Mexico. En: R. Robichaux y D. Yetman, eds. *The Tropical Deciduous Forest of Alamos: Biodiversity of a threatened ecosystem in Mexico*. University of Arizona, Tucson, Arizona, pp. 19-35.
- MARTÍNEZ-YRÍZAR, A., S. NÚÑEZ y A. BÚRQUEZ, 2007. Leaf Litter Decomposition in a Southern Sonoran Desert Ecosystem, Northwestern Mexico: Effects of Habitat and Litter Quality. *Acta Oecologica* 32: 291-300.
- MCCCLARAN, M.P. y T.R. VAN DEVENDER, eds. 1995. *The Desert Grassland*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- MELLINK, E. y G. DE LA RIVA, 2005. Non-Breeding Waterbirds at Laguna de Cuyutlan and its Associated Wetlands, Colima, Mexico. *Journal of the Field Ornithology* 76: 158-167.
- METZGER, M.J., M.D.A. ROUNSEVELL, L. ACOSTA, R. LEEMANS y D. SCHROTER. 2006. The Vulnerability of Ecosystem Services to Land Use Change. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 69-85.
- MORENO-VÁZQUEZ, J.L. 2006. *Por abajo del agua. Sobreexplotación y agotamiento del acuífero de la Costa de Hermosillo, 1945-2005*. El Colegio de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- NÚÑEZ, S., A. MARTÍNEZ-YRÍZAR, A. BÚRQUEZ y F. GARCÍA. 2001. Carbon Mineralization in the Southern Sonoran Desert. *Acta Oecologica* 22: 269-276.
- OROZCO-URÍAS, C.M. 2007. El pitayo (*Stenocereus thurberi*) un servicio ambiental clave en la vida de los mayo del sur de Sonora. Tesis de licenciatura, Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- OSBORNE, P.L. 2000. *Tropical Ecosystems and Ecological Concepts*. Cambridge University Press, Cambridge, Inglaterra.
- REINA-GUERRERO, A.L. 1993. Contribución a la introducción de nuevos cultivos en Sonora: las plantas medicinales de los Pimas Bajos del Municipio de Yécora. Tesis de licenciatura, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- ROMERO-LANKAO, P. 2006. Carbono y ciencias sociales, ¿una relación evidente? *Ciencia y Desarrollo* 36: 36-41.
- RZEDOWSKI, J. 1978. *Vegetación de México*. 1a. ed. Limusa, México.
- SHREVE, F. 1951. *Vegetation of the Sonoran Desert*. Carnegie Institution of Washington, Publication No. 591. Washington, D.C.
- STOLESON, S.H., R.S. FELGER, G. CEBALLOS, C. RAISH, M.F. WILSON y A. BÚRQUEZ. 2005. Recent History of Natural Resource Use and Population Growth in Northern Mexico. En: J-L.E. Cartron, G. Ceballos y R.S. Felger, eds. *Biodiversity, Ecosystems, and Conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, Nueva York, pp. 52-86.
- TURNER, R.M., J.E. BOWERS y T.L. BURGESS. 1995. *Sonoran Desert Plants: An Ecological Atlas*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- TURNER, R.M., R.H. WEBB, J.E. BOWERS y J.R. HASTINGS. 2003. *The Changing Mile Revisited: An Ecological Study of Vegetation Change with Time in the Lower Mile of an Arid and Semiarid Region*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- TURNER, R.M. y D.E. BROWN. 1982. Sonoran Desertscrub. En: D. E. Brown, ed. *Biotic communities of the American Southwest-United States and Mexico*. Desert Plants. Special Issue, núms. 1-4: 181-221.
- VAN DEVENDER, T.R. 1995. Desert Grassland History: Changing Climates, Evolution, Biogeography, and community Dynamics. En: M.P. McClaran y T.R. Van Devender, eds. *The Desert Grassland*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 68-99.
- VAN DEVENDER, T.R., A.C. SANDERS, R.K. WILSON y S. MEYER. 2000. Vegetation, Flora, and Seasons of the Rio Cuchujaqui, a Tropical Deciduous Forest near Alamos, Sonora. En: R. Robichaux y D. Yetman, eds. *The Tropical Deciduous Forest of Alamos. Biodiversity of a Threatened Ecosystem in Mexico*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 36-101.
- VAN DEVENDER, T.R., J.R. REEDER, C.G. REEDER y A.L. REINA. 2005. Distribution and Diversity of Grasses in the Yécora Region of the Sierra Madre Occidental of Eastern Sonora, Mexico. En: J-L.E. Cartron, G. Ceballos y R.S. Felger, eds. *Biodiversity, Ecosystems, and Conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, Nueva York, pp. 107-121.
- VARELA-ESPINOSA, L. 2005. Flora y vegetación de la región de San Javier, Sonora, México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM.

- WHITE, S.S. 1948. The Vegetation and Flora of the Region of the Rio Bavispe in Northeastern Sonora, México. *Lloydia* 11: 220-302.
- WHITMORE, R.C., R.C. BRUSCA, J.L. LEÓN DE LA LUZ, P. GONZÁLEZ-ZAMORANO, R. MENDOZA-SALGADO, E. AMADOR-SILVA, G. HOLGUIN, F. GALVÁN-MAGAÑA, P.A. HASTINGS, J-L.E. CARTRON, R.S. FELGER, J.A. SEMINOFF y C.C. MCIVOR. 2005. The Ecological Importance of Mangroves in Baja California Sur: Conservation Implications for an Endangered Ecosystem. En: J-L.E. Cartron, G. Ceballos y R.S. Felger, eds. *Biodiversity, Ecosystems, and Conservation in Northern Mexico*. Oxford University Press, Nueva York, pp. 298-333.
- WHITTAKER, R. 1975. *Communities and Ecosystems*. 2a. ed. MacMillan, Nueva York.
- WILDER, B.T., R.S. FELGER, H. ROMERO-MORALES. 2008. Succulent Plant Diversity of the Sonoran Islands, Gulf of California, Mexico. *Haseltonia* 14: 127-60.
- WILDER, B.T., R.S. FELGER, H. ROMERO-MORALES y A. QUIJADA-MASCAREÑAS. 2007. New Plant Records for the Sonoran Islands, Gulf of California, Mexico. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* 1: 1203-1227.
- WSTB (Water Science and Technology Board Report) 2004. Valuing Ecosystem Services: Toward Better Environmental Decision-Making (<http://dels.nas.edu/wstb>).
- YETMAN, D. 2006. *The Organ Pipe Cactus*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona.
- YETMAN, D.A., T.R. VAN DEVENDER, P. JENKINS y M. FISHBEIN. 1995. The Rio Mayo: A History of Studies. *Journal of the Southwest* 37: 294-345.
- YETMAN, D.A., T.R. VAN DEVENDER, R.A. LÓPEZ-ESTUDILLO y A.L. REINA-GUERRERO. 2000. Monte Mojino: Mayo People and Trees in Southern Sonora. En: Robichaux R., D. Yetman, eds. *The Tropical Deciduous Forest of Alamos: Biodiversity of a Threatened Ecosystem in Mexico*. University of Arizona Press, Tucson, Arizona, pp. 19-35.
- YETMAN, D. y R.S. FELGER. 2002. Ethnoflora of the Guarijíos. En: D. Yetman. *Guarijíos of the Sierra Madre: the Hidden People of Northwestern Mexico*. University of New Mexico Press, Albuquerque, Nuevo México, pp. 174-230.

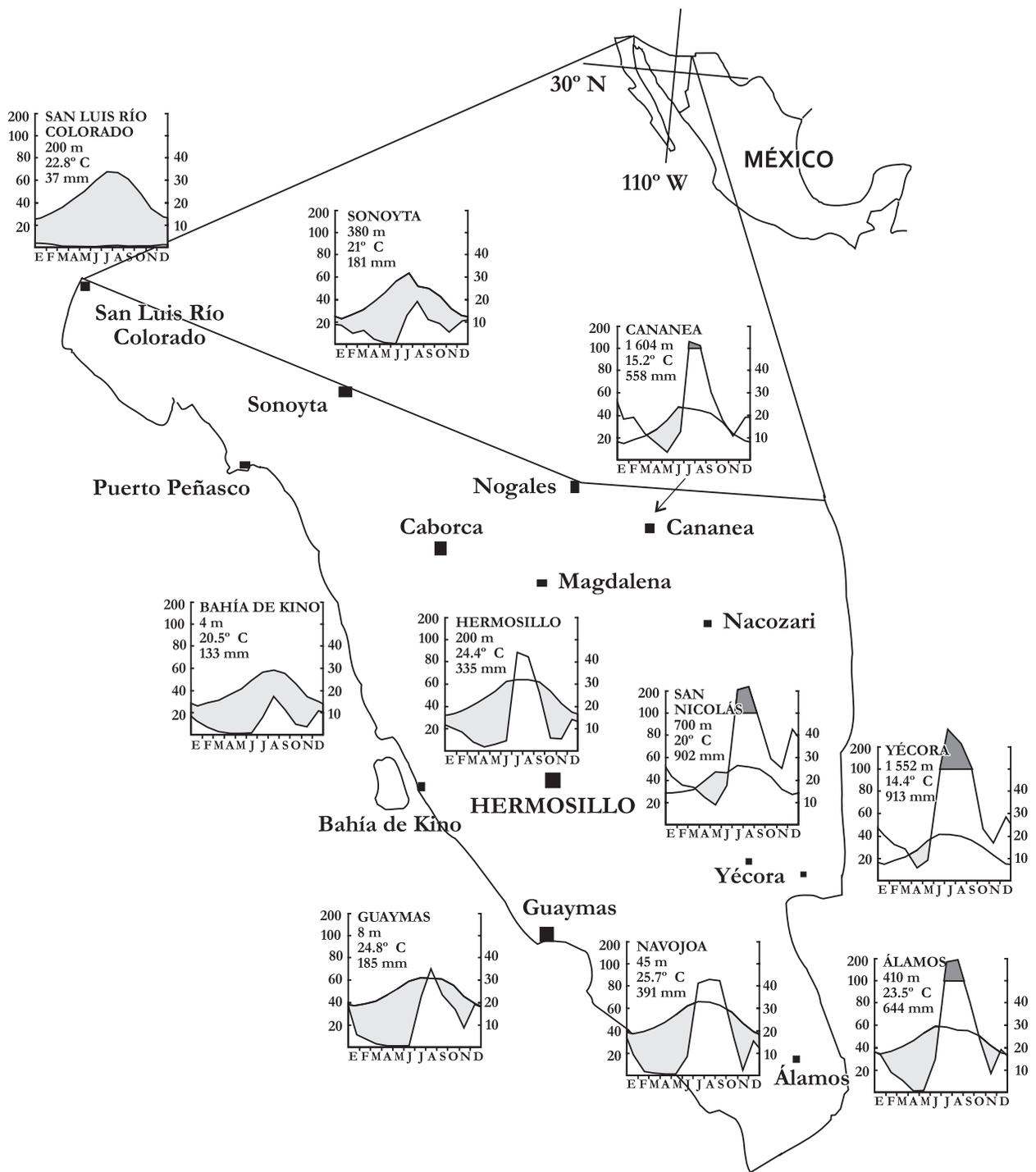


Figura 1. Climogramas ombrotérmicos que muestran la variación de la precipitación en Sonora, de norte a sur principalmente en la distribución estacional de la precipitación, y de oeste a este principalmente en la cantidad total de lluvia (datos de la Comisión Nacional del Agua, Hermosillo, Sonora, México). En gris claro se indica la temporada de déficit hídrico (sequía), en gris oscuro la temporada de superávit de agua (meses con una precipitación total de 100 mm o más) (modificado de Felger *et al.*, 2001).

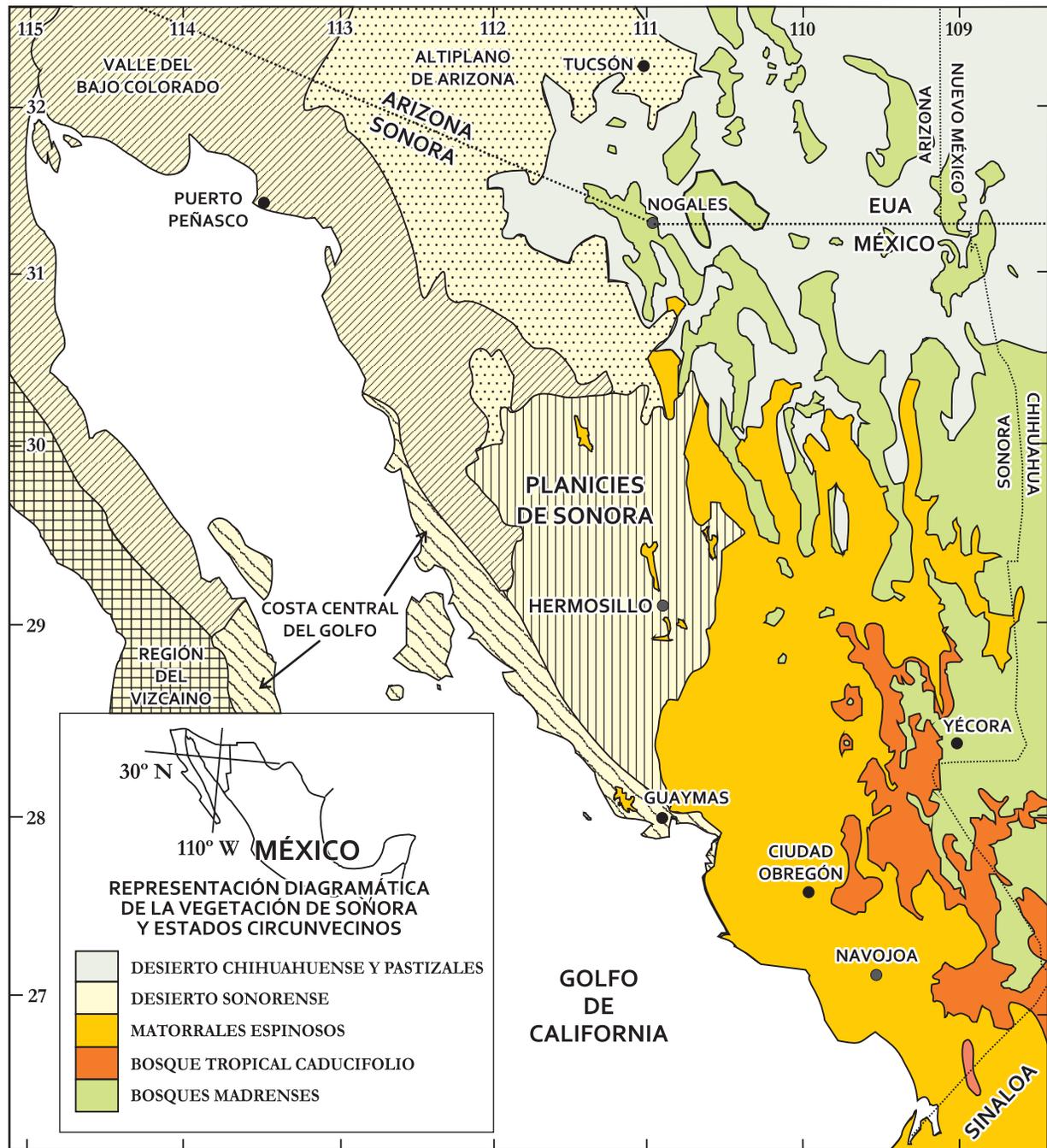


Figura 2. Distribución de los principales tipos de vegetación en Sonora, México. Para el bioma del Desierto Sonorense se indica la delimitación de cada una de las cuatro subdivisiones presentes en el estado (modificado de Felger *et al.*, 2001).



Figura 3. Vegetación de la subdivisión Valle del Bajo Río Colorado del Desierto Sonorense, Sonora. Dunas del Gran Desierto de Altar al oeste del escudo volcánico de El Pinacate, Sonora. Peter J. Grubb y Alberto Búrquez durante un extenso recorrido por la región a principios de octubre de 2003 (fotografía: A. Martínez-Yrizar).



Figura 4. Vegetación de la subdivisión Altiplano de Arizona del Desierto Sonorense en las inmediaciones de San Emeterio al este de Sonoyta, Sonora, con abundancia de *Carnegiea gigantea*, *Fouquieria macdougallii* y *Parkinsonia microphylla* (fotografía: A. Búrquez).



Figura 5. Amplia planicie típica de la subdivisión Costa Central del Golfo del Desierto Sonorense de la región seri en el estero Santa Rosa al sur de Punta Chueca, Sonora. Al fondo predominan las cactáceas columnares como elemento distintivo de la región. Al frente, vegetación halófila de dunas costeras en transición hacia el manglar (fotografía: A. Búrquez).



Figura 6. Vegetación de las islas del Golfo de California. Isla Choyuda al noroeste de Bahía de Kino, Sonora. Bosque de cactáceas columnares con dominancia de *Pachycereus pringlei* (fotografía: A. Búrquez).

Figura 7. Manglares bordeando la línea de costa en el estero Santa Rosa al sur de Punta Chueca, Sonora. En el valle, al pie de las montañas al fondo, se muestra el paisaje característico de la subdivisión Costa Central del Golfo (fotografía: A. Búrquez).



Figura 8. Vegetación típica de la subdivisión Planicies de Sonora en el valle de La Pintada durante el verano, a 60 km al sur de Hermosillo (fotografía: A. Búrquez).

Figura 9. Piedemonte de Sonora en los cerros del rancho La Caridad a 15 km al norte de Hermosillo, Sonora. La alineación de la montaña en la fotografía es este-oeste. Nótese el efecto de ladera en la estructura del matorral de mayor cobertura en las laderas con orientación norte (fotografía: A. Búrquez).



Figura 10. Matorral costero en el sur de Sonora con dominancia de la cactácea columnar *Stenocereus thurberi*. Por su gran abundancia, a este matorral se le conoce localmente con el nombre de «El Pitayal» (fotografía: A. Búrquez).

Figura 11. Bosque tropical caducifolio en la sierra San Javier durante la época de lluvias. Se localiza por la carretera federal 16 a 140 km al este de Hermosillo, Sonora (fotografía: A. Búrquez).





Figura 12. Mosaico de vegetación en la Sierra San Javier, Sonora, que ejemplifica la distribución disyunta del bosque tropical caducifolio y del encinar; este último en los suelos ácidos de color rojizo, alterados por acción hidrotermal (fotografía: A. Búrquez).

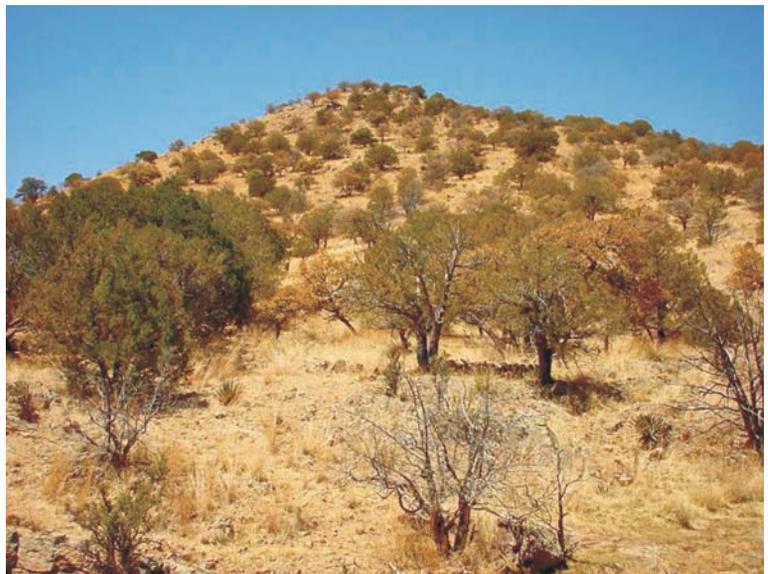


Figura 13. Bosque de *Quercus emoryi* («oak woodland») en las cercanías de Agua Prieta, Sonora, con un dosel abierto y un estrato herbáceo de gramíneas con evidencia de pastoreo (fotografía: A. Búrquez).



Figura 14. Bosque de encinos dominado por *Quercus chihuahuensis* en las cercanías de Bacadehuachi, en la sierra de Sonora (fotografía: A. Búrquez).

Figura 15. Bosque de pino-encino en las cercanías de Mesa de Tres Ríos, Sonora (fotografía: A. Búrquez).



Figura 16. Bosque de coníferas en cañada cerca de Mesa de Tres Ríos, Sonora. Nótese el bosque de encinos en las laderas de los cerros (fotografía: A. Búrquez).

Figura 17. Pastizal de altura madrense con bosque de coníferas en la frontera con Chihuahua, cerca del Pico de la India, Sonora (fotografía: A. Búrquez).





Figura 18. Pastizal de altura dominado por *Nolina texana* en el valle de las Ánimas al noreste de la sierra San Luis, en el noreste de Sonora (fotografía: T.R. Van Devender).

Figura 19. Vegetación del Desierto Chihuahuense en el noreste del estado en las cercanías de San Bernardino, Sonora (fotografía: A. Búrquez).



Figura 20. Pastizal inducido de zacate buffel en el área de Carbó a 50 km al norte de Hermosillo, Sonora. Un nuevo ecosistema sonorense de origen antrópico presente en prácticamente toda la subdivisión Planicies de Sonora del Desierto Sonorense (fotografía: A. Búrquez).



Figura 21. Paisaje altamente fragmentado por disturbio antropogénico, principalmente por desmontes para la siembra de zacate buffel al norte de Hermosillo, Sonora (fotografía: A. Búrquez).