

DIVERSIDAD Y ESTABILIDAD DEL AGROECOSISTEMA

Los agroecosistemas y los ecosistemas naturales están formados por organismos y el ambiente físico inerte en los cuales viven. Los tres capítulos anteriores han estado relacionados principalmente con los componentes físicos o biológicos de estos sistemas a nivel de poblaciones y comunidades. En este Capítulo, comenzamos a agregar los componentes abióticos de los ecosistemas, alcanzando el nivel de estudio del ecosistema. A este nivel, consideramos el sistema como una totalidad, obteniendo una imagen más completa de su estructura y función.

La complejidad que caracteriza al sistema es la base para las interacciones ecológicas que son fundamento clave para el diseño de agroecosistemas sostenibles.

La diversidad antes que nada es un producto, una medida y un fundamento de la complejidad del sistema, de aquí su habilidad para estimular un funcionamiento sostenible. Desde una perspectiva, la diversidad del ecosistema viene a ser el resultado de las formas en que están organizados e interactúa los diferentes componentes vivos e inertes del sistema. Desde otra perspectiva, la diversidad - manifestada por la complejidad de ciclos bioquímicos y la variedad de organismos vivientes - es lo que hace posible la organización e interacción del sistema mismo.

En este Capítulo, primero exploramos el significado de manejar los agroecosistemas como sistemas completos, aprovechando sus cualidades emergentes. Después examinamos la biodiversidad en ecosistemas naturales, el valor de la diversidad en un agroecosistema dado, cómo es evaluada la diversidad, y la función posible de la teoría de biogeografía de islas en el manejo de la diversidad. Finalmente, exploramos las conexiones entre diversidad ecológica, estabilidad y sostenibilidad en términos que apoyen el desarrollo de un marco de referencia para el diseño y manejo de los agroecosistemas.

ENFOQUES Y OPORTUNIDADES CONSIDERANDO EL SISTEMA EN SU TOTALIDAD

En el Capítulo 15 vimos cómo las interacciones entre las poblaciones de una comunidad de un cultivo dan como resultado cualidades emergentes que existen sólo en el nivel de comunidad. A nivel de ecosistema, existe otro grupo de cualidades emergentes que hacen al agroecosistema mucho más grande que la suma de sus partes (o la granja mucho más grande que la suma de los cultivos que posee). El manejo que funcionaría a este nivel puede tomar ventaja de la gran variedad de interacciones y procesos benéficos.

Manejando el Sistema en su Totalidad

La agroecología enfatiza la necesidad de estudiar tanto las partes como la totalidad. Aunque el concepto de que la totalidad es mayor que la suma de las partes sea ampliamente reconocido, esto ha sido ignorado durante mucho tiempo por la tecnología y la agronomía moderna, que han enfatizado el estudio en detalle de una planta o un animal, como una forma de enfrentar los problemas complejos de la producción de la granja y su viabilidad. Hemos aprendido mucho de la especialización y de un enfoque reduccionista en los componentes de un cultivo de un sistema agrícola, pero un entendimiento de toda la granja (y el sistema alimenticio completo) también debe desarrollarse para entender totalmente la sostenibilidad agrícola e implementar prácticas de manejo sostenible.

Cuando el manejo de los agroecosistemas considera las oportunidades que se presentan por las cualidades emergentes del sistema total, el paradigma de condiciones de *control* y poblaciones es reemplazado por el paradigma de *manejo*. Con el paradigma de manejo, estamos tratando siempre de considerar los efectos de cualquier acción o práctica sobre todo el

sistema, deliberadamente diseñamos prácticas que están basadas en el funcionamiento del sistema como un todo y de las cualidades emergentes.

Bajo el enfoque convencional, el intento de controlar rígidamente y homogeneizar frecuentemente todas las condiciones de forma individual, ocasiona la eliminación de interferencias y relaciones benéficas, dejando sólo las interacciones y relaciones negativas. Las prácticas de manejo convencional funcionan primordialmente a nivel de individuo o de la población en el sistema, en vez de funcionar a nivel de comunidad o del ecosistema, en donde ocurren interacciones más complejas.

Los problemas inherentes a nivel de población y de enfoques convencionales orientados al control, se han visto en décadas pasadas cuando son aplicados en el control de insectos plaga, arvenses y patógenos. Basados en el principio de que un insecto o arvense benéfica es el que está muerto, se ha desarrollado una increíble variedad de tecnologías para remover o eliminar cada plaga clave de los sistemas de cultivo. Estas tecnologías han simplificado los agroecosistemas en varias formas –por ejemplo, eliminando los depredadores de las plagas claves. Sin embargo, en agroecosistemas simplificados las invasiones de plagas son más comunes y perjudiciales, y el uso de insumos externos debe aumentarse para enfrentar esos problemas.

Construyendo con Diversidad

La prioridad principal en el manejo del sistema como un todo es crear un agroecosistema más complejo y diverso, porque sólo con mucha diversidad hay un potencial de obtener interacciones benéficas. El productor empieza aumentando el número de especies vegetales en el sistema, mediante diferentes prácticas de siembra, que se analizan más adelante con mayor detalle. La diversificación conduce a cambios positivos en las condiciones abióticas y atrae poblaciones de artrópodos benéficos y otros animales. Se desarro-

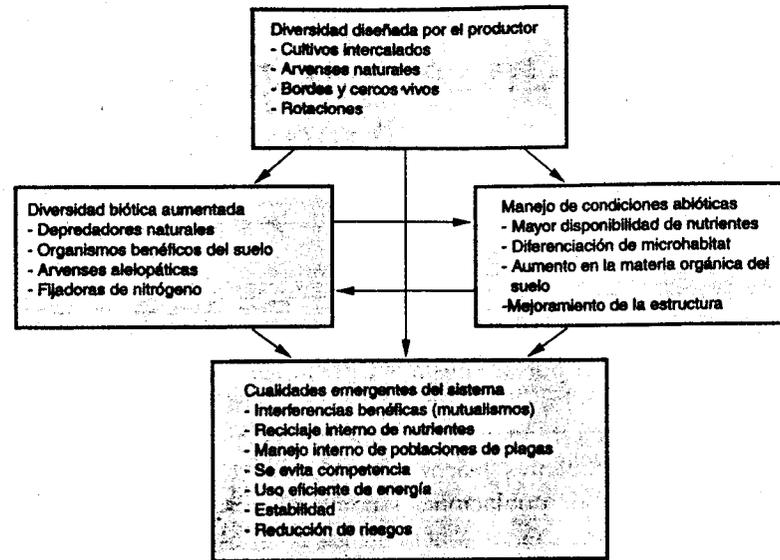


FIGURA 16.1

Dinámica del sistema en agroecosistemas diversos.

llan cualidades emergentes que permiten al sistema - con un manejo apropiado de sus componentes específicos- funcionar de manera que se mantiene la fertilidad, la productividad y regula las poblaciones de plagas. Esta concepción muy general de la dinámica del manejo de un agroecosistema está esquematizada en la Figura 16.1.

En un sistema complejo y diverso, todos los retos que enfrentan los productores, pueden ser solucionados con un manejo apropiado de cada uno de los componentes y sus interacciones, haciendo la dependencia de insumos externos casi innecesaria. Por ejemplo, en el manejo de plagas, las poblaciones pueden ser controladas por las interacciones en el sistema, establecidas intencionalmente por quien maneja el agroecosistema.

Los diversos métodos "alternativos" de manejo de plagas, desarrollados por agricultores orgánicos y agroécólogos, son un buen ejemplo de la diversidad basada en el manejo de la totalidad del sistema. Estos métodos se basan en el aumento de la diversidad y complejidad del agroecosistema, como principios para establecer interacciones positivas que mantengan bajo cierto control a las poblaciones de plagas. Descripciones de algunos de estos métodos, aplicados específicamente en agroecosistemas se presentan en el Cuadro 16.1.

CUADRO 16.1 Ejemplos de manejo alternativo de plagas basado en interacciones del sistema

Plaga problema	Práctica de manejo alternativo	Mecanismo(s) de acción
Pulgá saltona (<i>Phyllotreta cruciferae</i>), daña la brócoli.	Cultivo intercalado con mostaza silvestre (<i>Brassica</i> spp.).	Cultivo trampa atrae a la plaga
Minador de la hoja de la uva (<i>Erythroneura elegantula</i>) daña las hojas del viñedo.	Siembra de zarzamora (<i>Rubus</i> spp.) en los bordes del viñedo.	Aumenta la abundancia de hospederos alternativos para la avispa parásita <i>Anaegus epos</i> .
Afidos (<i>Rhopalosiphum maidis</i>), daña la caña de azúcar.	Siembra de gramíneas agresivas en los bordes.	Las gramíneas desplazan otras plantas que hospedan áfidos.
Daño del gusano elotero (<i>Heliothis zea</i>).	Permitiendo el desarrollo del complejo natural de arvenses en el cultivo.	Estimula la presencia y eficacia de depredadores de huevecillos y larvas de insectos plaga.
Daño del gusano soldado (<i>Spodoptera frugiperda</i>).	Cultivo intercalado con frijol.	Aumenta la abundancia y actividad de insectos benéficos.
Daño en yuca de la mosquita blanca (<i>Aleurotrachelus socialis</i>)	Cultivo intercalado con frijol caupí.	Aumenta el vigor de la planta de yuca y aumenta la abundancia de enemigos naturales.
Daño en ajonjolí del gusano telarañero (<i>Antigrosta</i> sp.).	Cultivo intercalado con maíz o sorgo.	La sombra del cultivo rechaza la plaga.
Daño en repollo de la palomilla de dorso de diamante (<i>Plutella xylostella</i>).	Cultivo intercalado con tomate.	Rechaza la palomilla químicamente, o enmascara la presencia del repollo.
Daño en manzana por la palomilla (<i>Cydia pomonella</i>).	Cultivos de cobertura con plantas específicas.	Provee fuente alternativa de alimento y hábitat para los enemigos naturales de la palomilla.
Daño en viñedos por la araña del Pacífico (<i>Eotetranychus willamette</i>).	Cultivo de cobertura con gramíneas.	Promueve la presencia de arañas depredadoras proveyendo hábitats de hibernación para presas alternativas de <i>E. willamette</i> .

Adaptado de Altieri (1994a) y Andow (1991).

TEMA ESPECIAL

Rhizobium, Leguminosas y el Ciclo de Nitrógeno

Una de las formas importantes en que los productores pueden tomar ventaja de la gran variedad del ecosistema, es introducir leguminosas fijadoras de nitrógeno al agroecosistema. Como resultado de la relación mutualista entre las plantas leguminosas y bacterias del género *Rhizobium*, el nitrógeno derivado de la atmósfera es puesto a disposición de los

miembros simbiotes del sistema. La habilidad de un sistema para satisfacer sus necesidades de nitrógeno de esta forma, es una cualidad emergente hecha posible por la diversidad biótica.

Las bacterias *Rhizobium* poseen la habilidad de capturar nitrógeno atmosférico del aire y del suelo, y convertirlo en una forma utilizable para las bacterias y también para las plantas. Estas bacterias pueden vivir libremente en el suelo, sin embargo, cuando las leguminosas están presentes, las bacterias infectan la estructura radical. Una bacteria se mueve hacia una célula radical interna, diferen-

ciándose y produciendo una forma de nódulo, en el cual la bacteria puede reproducirse. La bacteria en el nódulo radical empieza a recibir de la planta hospedante todos los azúcares que necesita, dándole la capacidad de vivir independiente; en reciprocidad el nitrógeno fijado por ellas lo vuelven disponible para la planta hospedante. La interacción provee una ventaja para ambos organismos: la planta es capaz de obtener nitrógeno que no estaría disponible sin la simbiosis, y la bacteria es capaz de alcanzar altas poblaciones que no podría obtener si viviera libre en el suelo. Se da mayor fijación de nitrógeno con leguminosas noduladas que con *Rhizobium* viviendo libre. Cuando la planta hospedante muere, la bacteria puede regresar a un tipo de vida autotrófica e incorporarse a la comunidad del suelo.

Como el nitrógeno es generalmente un nutriente limitante, la relación leguminosa - *Rhizobium* le permite sobrevivir en un suelo que contenga muy poco nitrógeno como para mantener a otras plantas. Y debido a que la leguminosa incorpora el nitrógeno que recibe de la bacteria en su biomasa, el nitrógeno entonces se convierte en

parte del suelo, disponible para ser usado por otras plantas si la leguminosa es incorporada al suelo cuando muere.

Este mutualismo ha sido importante en agricultura. La simbiosis leguminosa-*Rhizobium* es la fuente primaria de adición de nitrógeno en muchos agroecosistemas tradicionales, y fue uno de los únicos métodos usados para incorporar nitrógeno ambiental a muchos sistemas de cultivo, antes del desarrollo del fertilizante nitrogenado. Los cultivos de leguminosas han sido intercalados con cultivos no leguminosos, como en el policultivo de maíz-frijol-calabaza en América Latina, y las leguminosas son usadas como cultivos de cobertura y forraje fresco en los Estados Unidos y otras regiones, para mejorar la calidad del suelo y su contenido de nitrógeno. Las leguminosas también han sido importantes en el manejo de áreas en descanso agrícola. Todos estos sistemas toman ventaja de la simbiosis leguminosa-*Rhizobium*, usando la fijación biológica de nitrógeno para hacer que este elemento esté disponible para la comunidad vegetal completa y finalmente para los humanos.

DIVERSIDAD ECOLÓGICA

En ecología, el concepto de diversidad tiende a ser aplicado a nivel de comunidad: la diversidad es interpretada como el número de especies diferentes que conforman una comunidad en un lugar determinado. Sin embargo, los ecosistemas tienen otro tipo de variedad y heterogeneidad que va más allá de la predefinida por el número de especies. Los ecosistemas tienen diversidad en el arreglo espacial de sus componentes; por ejemplo, como se puede ver en los diferentes niveles de doseles en un bosque. Tiene diversidad en sus procesos funcionales y diversidad en los genomas de su biota. Y ya que los ecosistemas cambian en varias formas en el tiempo, tanto cíclica como direccionalmente, pueden presentar lo que se llamaría diversidad temporal. La diversidad, consecuentemente, tiene una variedad de diferentes *dimensiones*. Cuando estas dimensiones son reconocidas y definidas, el concepto de diversidad por sí solo es amplio y mucho más complejo: viene a ser lo que denominaremos **diversidad ecológica**.

CUADRO 16.2 Dimensiones de la diversidad ecológica en un ecosistema

Dimensión	Descripción
Especies	Número de diferentes especies en el sistema
Genética	Grado de variabilidad de información genética en el sistema (intra e inter especies)
Vertical	Número de diferentes niveles horizontales y estratos en el sistema.
Horizontal	Patrones de distribución espacial de los organismos en el sistema.
Estructural	Número de localidades (nichos, papeles tróficos) en la organización del sistema.
Funcional	La complejidad de interacciones, flujo de energía, y reciclaje de material entre los componentes del sistema.
Temporal	Grado de la heterogeneidad de cambios cíclicos en el sistema (diarios, estacionales, etc.)

Algunas de las posibles dimensiones de la diversidad ecológica se enumeran en el Cuadro 16.2. Otras dimensiones pueden ser reconocidas y definidas, pero estas siete dimensiones serán las utilizadas en este texto. (El término *biodiversidad* es empleado comúnmente para referirse a la combinación de la diversidad de especies y la diversidad genética). Estas diferentes dimensiones de la diversidad ecológica, son herramientas útiles para entender completamente la diversidad tanto en ecosistemas naturales como en agroecosistemas.

Diversidad en Ecosistemas Naturales

La diversidad parece ser una característica inherente de la mayoría de los ecosistemas naturales. Aunque el grado de diversidad entre diferentes ecosistemas varía ampliamente, los ecosistemas en general tienden a expresar gran diversidad dadas las limitaciones de sus ambientes abióticos.

La diversidad es en parte una función de la dinámica evolutiva. Como se analizó en el Capítulo 14, la mutación, la recombinación genética y la selección natural se combinan para producir variabilidad, innovación y diferenciación en la biota terrestre. Una vez que la diversidad es generada, tiende a ser autofortalecida. Mayor diversidad de especies conduce a una gran diferenciación de hábitats y mayor productividad, la cual permite más diversidad de especies.

La diversidad desempeña un importante papel en el mantenimiento de la estructura y función del ecosistema. Desde que Tansley (1935) acuñó el término "ecosistema", para referirse a la combinación de comunidades de plantas y animales y su ambiente físico, los ecólogos han tratado de demostrar la relación entre la diversidad y la estabilidad del sistema. Los ecosistemas naturales generalmente se apegan al principio de que mayor diversidad permite gran resistencia a las perturbaciones. Los ecosistemas con una gran diversidad tienden a recuperarse de perturbaciones y restablecer el balance en sus procesos de reciclaje de material y flujos de energía; en ecosistemas con poca diversidad, las perturbaciones pueden causar cambios permanentes en sus funciones, teniendo como resultado la pérdida de recursos del ecosistema y cambios en su conformación de especies.

Escala de la Diversidad

El tamaño del área a ser considerada tiene un impacto sobre cómo se ha de medir la diversidad (diversidad de especies en particular). La diversidad de especies de un lugar determinado, en un bosque, en un valle con un río es diferente a la diversidad de especies de las diferentes comunidades que se encuentran al otro lado del río en ese valle.

La diversidad de especies en un lugar determinado es generalmente denominada **diversidad alfa**. Esta es simplemente la variedad de especies en una área relativamente pequeña de una comunidad. La diversidad de especies en comunidades o hábitats - la variedad de especies de un lugar a otro - es denominada **diversidad beta**. Aún a gran escala, existe la **diversidad gama**, que es una medida de la diversidad de especies de una región tal como una cordillera o de un valle con un río.

La diferencia entre los tres tipos de diversidad puede ser ilustrada con un transecto hipotético de 5 km. Es posible determinar la diversidad alfa en cualquier lugar a lo largo del transecto, por ejemplo, el conteo de especies dentro de 10 m en un punto específico. La determinación de la diversidad beta, en contraste, incluye al menos dos puntos a lo largo del transecto en hábitats diferentes pero adyacentes. Si la conformación de especies de los dos lugares es muy diferente, la diversidad beta es grande; si la conformación de especies cambia poco entre los dos hábitats, la diversidad beta es poca. La determinación de la diversidad gama se hace a lo largo del transecto, considerando el número de especies y la variación de su distribución. En principio, la diferencia entre la diversidad alfa, beta y gama puede extenderse a otras dimensiones de la diversidad ecológica, tales como la diversidad estructural y funcional.

La diversidad alfa, beta y gama son conceptos útiles porque nos permiten describir cómo varían los ecosistemas y paisajes en su estructura y diversidad. Por ejemplo, un pastizal natural muy diverso que se extiende por cientos de kilómetros en cualquier dirección, es probable que tenga gran diversidad alfa, pero ya que las mismas especies se encuentran en la misma proporción relativa en todos los lugares de una amplia área, la diversidad beta y gama son relativamente bajas. Como un ejemplo contrastante, considere un paisaje conformado de un mosaico complejo

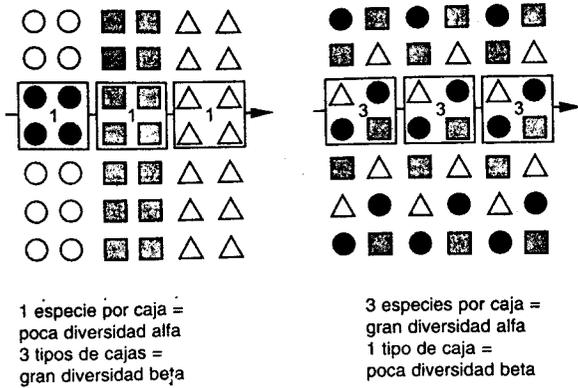


FIGURA 16.2

Diversidad alfa vs. diversidad beta en el contexto de agroecosistema. Por simplicidad, cada forma representa una planta del cultivo y cada grupo una localidad. Esta escala es algo arbitraria y de aquí que una calidad puede comprometer nuevas plantas del cultivo. El objetivo del diagrama es mostrar el contraste que puede representar: (a) tres cultivos sembrados en franjas, y (b) cultivos intercalados entre los tres cultivos.

de comunidades simples, tales como un pastizal no nativo, una comunidad de bosque dominada por una sola especie, y una comunidad de vegetación baja que crece en laderas accidentadas o escarpadas. La diversidad alfa es relativamente baja en cada una de las comunidades, pero en cualquier transecto en el área que cruce una variedad de grupos de especies, hace a la diversidad beta y gama relativamente alta.

Las escalas de la diversidad alfa y beta tienen aplicaciones útiles particularmente en los agroecosistemas. Un sistema de cultivo con gran diversidad beta, por ejemplo, puede proveer generalmente las mismas ventajas que un sistema de cultivo con gran diversidad alfa, siempre y cuando ofrezca mayor facilidad de manejo (Figura 16.2).

Procesos Sucesionales y Cambios de Diversidad

Estudios de ecosistemas naturales en sus primeras etapas de desarrollo o después de perturbaciones, indican que todas las dimensiones de la diversidad tienden a aumentar a través del tiempo. Este proceso sucede por la diversificación de nichos, modificaciones de hábitats, desplazamiento competitivo, reparti-

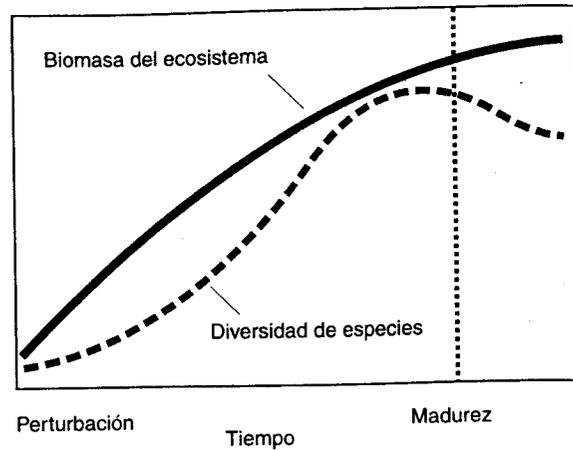


FIGURA 16.3

Cambios en la diversidad de especies y biomasa durante la sucesión secundaria.

ción de recursos, y el desarrollo de coexistencias, mutualismos y otras formas de interferencia.

La variabilidad y fluctuación en los procesos de los ecosistemas están influenciados directamente por esta diversidad, dando al sistema la apariencia de mayor estabilidad al aumentar la diversidad.

Cuando un ecosistema es perturbado, cada una de las dimensiones en su diversidad ecológica es simplificada, o regresada a una etapa de desarrollo anterior; el número de especies es reducido, la estratificación vertical disminuye y ocurren menos interacciones. Posterior a la perturbación, el ecosistema inicia un proceso de recuperación que es denominado sucesión secundaria (Figura 16.3 y el Capítulo 17 presenta más detalles). Durante este proceso, el sistema empieza a restablecer la diversidad de especies, interacciones, y procesos que existieron antes de la perturbación.

Eventualmente, el sistema alcanza un estado llamado madurez, la cual puede ser definida como la condición sucesional en la cual puede ser desarrollado el completo potencial del flujo de energía, reciclaje de nutrientes, y dinámica poblacional en el ambiente físico en el que se encuentra. La diversidad estructural y funcional de un ecosistema maduro provee resistencia al cambio en caso de futuras perturbaciones menores.

Aunque la diversidad tiende a aumentar en las etapas sucesionales, investigaciones ecológicas recientes indican que la madurez puede no representar etapas de la mayor diversidad, al menos en términos

de especies. En su lugar, la mayor diversidad es adquirida conforme un sistema se acerca a su madurez, reduciéndose ésta ligeramente después haber alcanzado la madurez completa. Aunque en tasas lentas, la biomasa continúa incrementándose durante la madurez.

Diversidad y Estabilidad

En ecología se ha discutido considerablemente la relación entre la diversidad y la estabilidad. Aparentemente, hay alguna correlación entre las dos – esto es, a mayor diversidad de un ecosistema, hay más resistencia al cambio, y mejores posibilidades de recuperarse de perturbaciones- pero hay desacuerdo sobre el grado y fortaleza de esta correlación.

Mucho de este problema viene de la naturaleza restringida de la definición aceptada de estabilidad. “Estabilidad” usualmente se refiere a la ausencia relativa de fluctuación en las poblaciones de organismos del sistema, indicando una condición balanceada, o sin cambio. Esta noción de estabilidad es inadecuada, especialmente para describir los resultados ecológicos de la diversidad. Lo que necesitamos es una definición más amplia de estabilidad (o un nuevo término) basado en las características del sistema, una definición que enfoque la *fortaleza* de un ecosistema, su habilidad de mantener niveles complejos de interacciones y procesos autorreguladores de flujo de energía y reciclaje de materiales. Esta noción ampliada de estabilidad se requiere, en particular, para el entendimiento del valor y uso de diversidad en los agroecosistemas, los cuales son estables según el término convencional.

Para un mejor entendimiento de lo que realmente es estabilidad, necesitamos más investigación de las posibles relaciones entre las diferentes formas de diversidad ecológica y los procesos específicos de un ecosistema y sus características. Algunos trabajos importantes se han realizado. Por ejemplo, se ha determinado que una gran diversidad de especies de aves, está correlacionada con una estructura compleja de la comunidad, porque ésta mantiene mayor variedad de comportamientos de anidamiento y alimentación. De forma similar, la diversidad depredador-presa y una cadena alimenticia más compleja está relacionada tanto con el número de especies así como con la diversidad del hábitat.

Debemos seguir teniendo cuidado de no caer en la trampa de un razonamiento circular, donde empezamos a creer que la diversidad siempre conduce a la estabilidad y una vez que tenemos más estabilidad, se llegará a tener más diversidad. Para que los conceptos de diversidad y estabilidad sean aplicados en agricultura, necesitamos estudios que correlacionen los diferentes tipos de diversidad con los procesos de productividad y de ahí hacia la sostenibilidad.

Diversidad Ecológica en Agroecosistemas

En la mayoría de los agroecosistemas, regularmente, las perturbaciones suceden mucho más frecuente y con mayor intensidad que en los ecosistemas. Raramente los agroecosistemas pueden alcanzar un gran desarrollo sucesional. Como resultado, la diversidad en los agroecosistemas es difícil de mantener.

La pérdida de diversidad debilita los enlaces funcionales entre especies que caracterizan a los ecosistemas naturales. Las tasas de reciclaje de nutrientes, los cambios de eficiencia y el flujo de energía son alterados, y aumenta la dependencia de insumos y de interferencia humana. Por estas razones, un agroecosistema es considerado ecológicamente inestable.

Sin embargo, los agroecosistemas no necesitan ser tan simplificados y pobres en diversidad como un agroecosistema convencional. Dentro de las limitantes impuestas por la necesidad de cosechar biomasa, los agroecosistemas pueden tender al nivel de diversidad que presentan los ecosistemas naturales, y beneficiarse del aumento de la estabilidad que permite una mayor diversidad. Manejar la complejidad de interacciones posibles, cuando la mayoría de los elementos que estimulan la diversidad están presentes en el sistema de granja, es clave para reducir la necesidad de insumos externos y procurar la sostenibilidad.

El Valor de la Diversidad del Agroecosistema

Una estrategia clave en agricultura sostenible es reincorporar la diversidad en el paisaje agrícola y manejarlo con mayor eficacia. Aumentar la diversidad es un enfoque contrario a la mayoría de la agricultura convencional actual, la cual alcanza su extremo en los monocultivos a gran escala. Parecería que la diversidad es vista como vulnerabilidad en esos sistemas, es-

pecialmente cuando consideramos todas las entradas y prácticas que se han desarrollado para limitar la diversidad y mantener la uniformidad.

Investigaciones recientes en sistemas de cultivos múltiples subestiman la gran importancia de la diversidad en la agricultura (Francis 1986, Amador y Gliessman 1990, Vandermeer 1989, Altieri 1995b). La diversidad es de gran valor para los agroecosistemas por las siguientes razones:

- Con una gran diversidad, la diferenciación de hábitats aumenta, permitiendo a las especies del sistema que sean "especialistas del hábitat". Cada grupo puede crecer en un ambiente exclusivo que satisface sus necesidades únicas.
- Si la diversidad aumenta, también aumentan las oportunidades de coexistencia y la interferencia entre especies que pueden estimular la sostenibilidad agroecológica. La relación entre las leguminosas fijadoras de nitrógeno y los cultivos asociados a ellas pueden ser el primer ejemplo, como se ha discutido en párrafos anteriores.
- En un agroecosistema diverso, los ambientes perturbados y asociados con situaciones agrícolas son ventajosos. Los hábitats abiertos pueden ser colonizados por especies útiles que ya existen en el sistema, en vez de ser invadidos por arvenses, e invasores pioneros provenientes de fuera del sistema.
- Una gran diversidad hace posible varios tipos de dinámicas de poblaciones benéficas entre herbívoros y sus depredadores. Por ejemplo, un sistema diverso puede estimular la presencia de varias poblaciones de herbívoros, siendo solo algunos de ellos realmente plagas, así como la presencia de depredadores que se alimentan de todos los herbívoros. Los depredadores estimulan la diversidad entre las especies herbívoras, al mantener control sobre alguna especie en particular. Con gran diversidad de herbívoros, el herbívoro plaga no puede dominar ni perjudicar a ningún cultivo.
- Una mayor diversidad generalmente permite una mejor eficiencia en el uso de recursos en un agroecosistema. Existe una mejor adaptación a la heterogeneidad de hábitats a nivel de sistema, que conduce a la complementariedad de las necesidades de los cultivos, diversificación de nichos, traslape de nichos de las especies y compartir recursos. Por ejemplo, el tradicional cultivo múltiple de maíz-frijol-calabaza junta tres cultivos diferentes pero complementarios entre sí. Cuando los tres son sembrados en un campo heterogéneo, las condiciones del suelo satisfacen las necesidades de al menos uno de los tres cultivos. Cuando son sembrados en un suelo uniforme cada cultivo ocupa un nicho ligeramente diferente, teniendo diferentes demandas de los nutrimentos del suelo.
- La diversidad reduce los riesgos para el productor o campesino, especialmente en áreas con condiciones ambientales impredecibles. Si en un cultivo no le va bien, los ingresos de los otros cultivos pueden compensar esa baja.
- Un ensamblaje diverso de cultivos puede crear una diversidad de microclimas en un sistema de cultivo, que puede ser ocupado por un amplio rango de organismos, no cultivos, incluyendo depredadores, parásitos benéficos y antagonistas – que son importantes en el sistema en general, y que no podrían ser atraídos a un sistema uniforme y simplificado.
- La diversidad en el paisaje agrícola puede contribuir a la conservación de la biodiversidad en los ecosistemas naturales que se encuentran alrededor, un aspecto que será discutido en el Capítulo 19.
- La diversidad – especialmente aquella que se encuentra bajo el nivel del suelo y es parte del sistema – realiza varios servicios ecológicos que tiene impacto tanto dentro como fuera de la parcela, tales como el ciclo de nutrimentos, regulación de procesos hidrológicos y la desintoxicación de productos químicos nocivos.

Cuando nuestro entendimiento sobre la diversidad vaya mas allá de las especies de cultivo, incluyendo plantas no cultivadas (comúnmente llamadas arvenses, pero con valor ecológico y humano), animales (especialmente enemigos de plagas o animales benéficos a los humanos) y microorganismos (la diversidad de bacterias y hongos son esenciales para mantener muchos procesos bajo el nivel del suelo del agroecosistema), podremos empezar a ver el rango de procesos ecológicos que son promovidos por la mayor diversidad.

Métodos para Aumentar la Diversidad en los Sistemas Agrícolas

Una variedad de opciones y alternativas están disponibles para incrementar los beneficios de la diversidad, señalados anteriormente, al paisaje agrícola. Estas opciones pueden considerar lo siguiente: (1) introducir nuevas especies al sistema de cultivo existente, (2) reorganizar o reestructurar las especies que ya están presentes, (3) agregar prácticas e insumos estimuladores de diversidad y (4) eliminar prácticas e insumos que reducen o restringen la diversidad.

Cultivos Intercalados. La forma principal y directa de aumentar la diversidad alfa de un agroecosistema, es sembrar dos o más cultivos juntos intercalados, que permitan interacciones entre los individuos de diferentes cultivos. El intercalar cultivos es una forma común de cultivos múltiples, lo cual es definido como la intensificación y diversificación de cultivos en dimensiones de tiempo y espacio “ (Francis 1986). El intercalar cultivos puede agregar diversidad temporal, mediante siembras secuenciales de diferentes cultivos durante la misma estación, y la presencia de más de un cultivo agrega diversidad horizontal, vertical, estructural y funcional al sistema. Estos sistemas están más desarrollados en los sistemas de granjas tradicionales de las áreas rurales o en desarrollo, especialmente en los trópicos. Los cultivos intercalados o sistemas de policultivo varían desde mezclas relativamente simples de dos o tres cultivos, hasta

complejas mezclas de cultivos que se encuentran en agroecosistemas de agrosilvicultura o en agroecosistemas de huertos caseros (que se discutirán con más detalle en el Capítulo 17).

Cultivo en Franjas. Otra forma de cultivos múltiples es sembrar diferentes cultivos en franjas adyacentes,



FIGURA 16.4
Dos ejemplos de cultivos múltiples. Zanahoria, remolacha y cebolla crecen juntos en Witzenhausen, Alemania (arriba); se combinan cultivos anuales y perennes para formar el huerto casero diverso en Riva de Garda, Italia (izquierda).

creando lo que se puede denominar un policultivo de monocultivos. Esta práctica, la cual aumenta la diversidad beta en lugar de la diversidad alfa, puede proveer muchos de los beneficios de los cultivos múltiples. Para algunos cultivos o mezcla de cultivos, este es un método práctico para aumentar la diversidad, ya que presenta menos retos u obstáculos para el manejo que los cultivos intercalados.

Cercas Vivas y Vegetación Amortiguadora. Los árboles y arbustos plantados en el perímetro de los campos, parcelas, a lo largo de caminos de una granja, o para marcar límites, pueden tener muchas funciones útiles. En términos prácticos, pueden ofrecer protección contra el viento, excluir (o encerrar) animales y producen una amplia gama de productos fo-



FIGURA 16.5

Una cerca viva de uso múltiple alrededor de un huerto casero en Tepeyanco, Tlaxcala, México. El cactus forma una barrera contra animales y el chayote y los árboles de albaricque proveen comida.

restales (leña, material de construcción, frutas, etc.). Ecológicamente, los cercos y las franjas amortiguadoras de vegetación aumentan la diversidad beta de una granja o parcela, y pueden servir para atraer y proveer de organismos benéficos al sistema. Cuando se tiene vegetación plantada en franjas más anchas, especialmente entre el área agrícola y la vegetación adyacente a ecosistemas naturales, se forman zonas amortiguadoras que pueden reducir un amplio ámbito de potenciales impactos de un sistema a otro, así como también aumenta la biodiversidad general de la región.

Cultivos de Cobertura. Un cultivo de cobertura es una especie que no es el cultivo principal, se siembra en el campo o parcela para proveer cobertura al suelo, generalmente entre los ciclos agrícolas. Los cultivos de cobertura pueden ser anuales o perennes, e incluye muchos grupos taxonómicos, aunque predominantemente se utilizan los pastos o gramas y leguminosas. Al aumentar la diversidad en un sistema al sembrar uno o más cultivos de cobertura, se tienen una variedad de beneficios importantes. Los cultivos de cobertura aumentan la materia orgánica del suelo, estimulan la actividad biológica del suelo y la diversidad de la biota del mismo, atrapa nutrientes del suelo que no son aprovechados por los cultivos, reduce la erosión del suelo, contribuye a la fijación biológica del nitrógeno (si el cultivo de cobertura es una leguminosa), y puede ser hospedante alterno para enemigos benéficos de los insectos plaga de los cultivos. En algunos sistemas, tales como huertos, los cultivos de cobertura pueden servir para un propósito adicional: inhibir el desarrollo de arvenses nocivas (Paulus 1994).

Rotaciones. El sembrar cultivos en rotación es un método importante para aumentar la diversidad de un sistema en el tiempo. Las rotaciones generalmente consisten en sembrar diferentes cultivos en sucesión o en secuencia recurrente. Entre mayor sea la diferencia del impacto ecológico en el suelo de los cultivos en rotación, mayor será el beneficio de este método. Alternando cultivos se puede crear lo que se conoce como efecto rotacional, que se obtiene cuando un cultivo se beneficia cuando se siembra después de otro cultivo diferente, en comparación de si fuera sembrado en un sistema de monocultivo continuo.

Agregando los residuos de diferentes plantas al suelo, las rotaciones ayudan a mantener la diversidad biológica. Cada tipo de residuo varía química y biológicamente, estimulando y/o inhibiendo diferentes organismos del suelo. En algunos casos, los residuos de un cultivo son capaces de promover la actividad de organismos que son antagónicos a plagas o enfermedades para el cultivo subsiguiente. Las rotaciones también tienden a mejorar la fertilidad del suelo y sus propiedades físicas, reducen la erosión del suelo y adicionan más materia orgánica. Las ventajas bien conocidas de la rotación soya/maíz/leguminosa-heno, usadas en el medio oeste de Estados Unidos, están basadas en parte en la manera en que la mayor diversidad temporal agrega nutrimentos y ayuda al control de enfermedades. La investigación sobre los impactos de las rotaciones en la diversidad puede mejorar la efectividad de esta importante práctica (Altieri 1995b).

Barbechos o Cultivo de Descanso. Una variación de la práctica de rotación es permitir, en la secuencia de cultivos, un periodo en donde la tierra simplemente es dejada sin cultivar, o en barbecho. La introducción de un periodo de descanso permite que el suelo "descanse", un proceso que involucra la sucesión secundaria y la recuperación de la diversidad en muchos elementos del sistema, especialmente el suelo. La agricultura transhumante, discutida en el Capítulo 10, es probablemente el sistema de barbecho mejor conocido, el periodo largo de descanso permite la reintroducción de diversidad de plantas y animales nativos y la recuperación de la fertilidad del suelo. En algunos sistemas, el periodo de descanso es utilizado principalmente para crear un mosaico de parcelas en diferentes etapas sucesionales, desde campos cultivados hasta el segundo crecimiento de la vegetación nativa. En regiones de agricultura de secano, el descanso puede hacerse en años alternos para permitir que la lluvia recargue las reservas de humedad en el suelo, mientras se promueve la recuperación de la diversidad en el ecosistema suelo durante un ciclo sin cultivar. Otra variación sobre el uso del periodo de descanso es hacerlo productivo además de ser protector: en agroforestería de roza-tumba y descanso, cultivos específicos son introducidos justo antes de iniciar el descanso, o intencionalmente permitido para restablecer, de tal

forma que se puedan tener cosechas durante el periodo de descanso (Denevan y Padoch 1987). Cuando el barbecho es incorporado en un ciclo de cultivo, es la ausencia de la perturbación humana, no sólo la ausencia del cultivo, la que permite el proceso de recuperación de la diversidad.

Labranza Reducida o Labranza Mínima. Debido a que la principal función de la perturbación en un agroecosistema es limitar el desarrollo sucesional, la diversidad y la estabilidad, una práctica que reduzca la perturbación puede ayudar a promover la diversidad. Reducir la intensidad del cultivo del suelo y dejar residuos sobre la superficie de éste, constituye el método más eficaz de reducir la perturbación. Las ventajas de reducir tanto la frecuencia como la intensidad de cultivo se discutieron en el Capítulo 8. Comparaciones de labranza convencional y prácticas de cero labranza, muestran el aumento en la abundancia y actividad de las lombrices de tierra, mayor diversidad de organismos consumidores de suelo materia orgánica y de organismos descomponedores, y un mejoramiento de la estructura del suelo, capacidad de retención de nutrimentos, reciclaje interno de nutrimentos y contenido de materia orgánica (House y Stinner 1983, Stinner *et al.* 1984, Hendrix *et al.* 1986). Aun cuando la diversidad sobre el nivel del suelo, de un sistema de cultivo permanece baja, la diversidad de especies en el subsistema de descomponedores en el suelo aumenta, aún con una perturbación reducida del suelo. Aumentando la diversidad vegetal sobre el suelo se puede promover solamente este subsistema.

Altos Ingresos de Materia Orgánica. Altos niveles de materia orgánica son cruciales para fomentar la diversificación de especies del subsistema bajo el suelo, involucrando el mismo tipo de estimulación de la diversidad funcional y estructural, comentada anteriormente en los sistemas de labranza reducida. La adición de gran cantidad de materia orgánica ha sido considerada como un componente clave de la agricultura orgánica, dando muchos beneficios, los cuales fueron revisados en el Capítulo 8. El contenido de materia orgánica del suelo puede aumentarse con la aplicación de compost, incorporando residuos de cultivos, con cultivos de cobertura, diversificando cultivos y utilizando otras prácticas de cultivo que promuevan la diversidad.

CUADRO 16.3 Métodos para aumentar la diversidad ecológica en un agroecosistema

Dimensiones de la diversidad ecológica afectada

Método	Especie	Genético	Vertical	Horizontal	Estructural	Funcional	Temporal
Cultivos Intercalados	■	■	■	■	■	■	■
Franja de cultivo	■	■	■	■	■	■	■
Cercas vivas y vegetación amortiguadora	■	■	■	■	■	■	■
Cultivo de cobertura	■	■	■	■	■	■	■
Rotación de cultivos	■	■	■	■	■	■	■
Cultivo descanso	■	■	■	■	■	■	■
Labranza mínima	■	■	■	■	■	■	■
Elevado entradas de materia	■	■	■	■	■	■	■
Reducción de uso de químicos	■	■	■	■	■	■	■

■ Directo o efectos primarios
 ■ Indirecto, secundario o efectos potenciales
 ■ Poco o nada de efecto

Reducción del Uso de Agroquímicos. Desde hace mucho tiempo se reconoce que muchos plaguicidas dañan o matan muchos organismos ajenos a las plagas de los sistemas de cultivo, o dejan residuos que pueden limitar la abundancia y diversidad de otros organismos. De aquí que, reduciendo o eliminando el uso de plaguicidas, se remueve un obstáculo mayor para la re-diversificación del agroecosistema. El proceso de recolonización es discutido posteriormente en este Capítulo. Sin embargo, debe reconocerse que eliminar plaguicidas de un sistema que es dependiente de estos es un reto. La primera respuesta puede ser un aumento dramático en las poblaciones de las plagas, sólo con el tiempo y el reestablecimiento de la diversidad se pueden desarrollar mecanismos internos para mantener a las plagas bajo control. Un marco experimental para examinar los cambios en la diversidad que ocurre con el establecimiento de lo que puede ser llamado "un marco libre de estrés por plaguicidas" en el agroecosistema, se presenta en el Capítulo 20.

Manejo de la Diversificación

El cambiar de un agroecosistema uniforme y de monocultivo hacia un sistema más diverso, fortaleciendo los procesos benéficos y las interacciones, es un proceso de varios pasos. Inicialmente, todas las formas ya discutidas y comentadas de introducir diversidad en el paisaje agrícola, ayudan a mitigar los impactos negativos de las actividades agrícolas. Por lo tanto, la introducción de más especies, ya sea como un efecto directo como indirecto, amplía las oportunidades para la estructura y función de agroecosistemas integrados, permitiendo la formación de amortiguadores locales y la dinámica del sistema, para estimular la variabilidad como respuesta del sistema. Finalmente, los tipos y formas de in-

terferencia en un paisaje diversificado, hacen posible más tipos de interacciones, desde exclusión competitiva hasta mutualismos simbióticos.

El manejo de la diversidad a nivel de granja o parcela es un gran reto. Comparado con el manejo convencional, este puede involucrar más trabajo, más riesgo y más incertidumbre. También se requieren más conocimientos. Sin embargo, finalmente, entendiendo las bases ecológicas de cómo opera la diversidad en un agroecosistema, y tomando ventaja de la complejidad en lugar de tratar de eliminarla, es la única estrategia que conduce a la sostenibilidad.

EVALUACIÓN DE LA DIVERSIDAD DE CULTIVOS Y SUS BENEFICIOS

Para manejar más eficientemente la diversidad, necesitamos formas para determinarla y evaluar cómo su aumento impacta realmente el comportamiento y funcionamiento de un agroecosistema. Necesitamos ser capaces de reconocer la presencia de diversidad y

los patrones de su distribución en el paisaje, y necesitamos conocer, y a que grado, si la presencia de esa diversidad beneficia a la actividad del agroecosistema, especialmente desde el punto de vista del productor. Algunos enfoques han sido considerados para analizar e investigar la presencia e impacto de la diversidad.

Indices de Diversidad de Especies

Es indiscutible que cualquier tipo de sistema de cultivos intercalados es más diverso que un monocultivo. Comparando la diversidad de dos diferentes sistemas de cultivos intercalados— que varía en número de especies y proporciones de siembra — requiere que determinemos la diversidad de cada sistema. Para hacerlo, podemos utilizar herramientas y conceptos desarrollados por ecólogos para ecosistemas naturales.

Los ecólogos reconocen que la diversidad de un ecosistema o comunidad, es determinada por algo más que sólo el número de especies. Una comunidad de 50 árboles de sequoia, 50 robles y 50 abetos es más diverso que una comunidad conformada por 130 árboles de sequoia, 10 robles y 10 abetos. Ambas tienen el mismo número de especies y total de individuos, pero los individuos de la primera comunidad están distribuidos más uniformemente entre las especies que aquellos de la segunda comunidad, donde dominan los árboles de sequoia.

Este ejemplo demuestra que hay dos componentes de la diversidad de especies: el número de especies, denominado **riqueza de especies** y la uniformidad de la distribución de los individuos en el sistema entre las diferentes especies, denominado **uniformidad de especies**. Ambos componentes deben

ser considerados en cualquier medida comprensiva de diversidad, tanto de ecosistemas naturales como en agroecosistemas.

En el Cuadro 16.4 se demuestra cómo estos conceptos pueden ser aplicados al analizar la diversidad de los agroecosistemas, donde se comparan cuatro diferentes sistemas hipotéticos, cada uno con el mismo número de individuos de plantas de cultivo. Entre estos sistemas, el policultivo de tres cultivos es el más diverso, ya que es el único en el que tanto la riqueza de especies como la uniformidad de especies es alta, en relación con los otros sistemas.

En lugar de usar el número de individuos de cada especie como base para determinar la diversidad de especies del sistema, es posible utilizar algunas otras características de las especies, tales como la biomasa o la productividad. Esto puede ser más apropiado, por ejemplo, cuando la biomasa de un individuo típico de una especie es muy diferente de la biomasa de los individuos de las otras especies. El número de individuos, la biomasa y la productividad son ejemplos de **valor de importancia** para una especie en particular.

La ecología ofrece varias formas de cuantificar la diversidad de especies de un sistema. El método más simple es ignorar la uniformidad de especies y determinar el número de especies en términos de número de individuos. Esta medida se obtiene por el Índice de diversidad de Mergalef:

$$diversidad = \frac{s - 1}{\log N}$$

donde *s* es el número de especies y *N* es el número de individuos. La utilidad del índice de Mergalef es limitado, porque no puede distinguir la diversidad varia-

CUADRO 16.4 Medidas de diversidad de cuatro agroecosistemas hipotéticos

	Monocultivo	Policultivo uniforme de dos cultivos	Policultivo uniforme de tres cultivos	Policultivo no uniforme de tres cultivos
Plantas de maíz	300	150	100	250
Plantas de calabaza	0	150	100	25
Plantas de frijol	0	0	100	25
Número de especies (<i>s</i>)	1	2	3	3
Número de individuos (<i>N</i>)	300	300	300	300
Riqueza relativa de especies	baja	media	alta	alta
Uniformidad relativa de especies	alta	alta	alta	baja

ble de sistemas con el mismo s y N , tales como en el policultivo uniforme y heterogéneo de tres cultivos del Cuadro 16.4.

Hay otros dos índices de diversidad que consideran la uniformidad de especies y son más útiles. El **Índice de Shannon** es una aplicación de la teoría de la información, basado en la idea de que la mayor diversidad corresponde a la mayor incertidumbre en escoger aleatoriamente un individuo de una especie en particular. Este es dado por la siguiente fórmula:

$$H = \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \left(\log_2 \frac{n_i}{N} \right)$$

donde n_i es el número de individuos en el sistema (o muestra) que pertenece a la especie "i".

El **Índice de Simpson** de diversidad es el inverso de un índice de dominancia de la comunidad con el mismo nombre. Este índice está basado en el principio de que un sistema es más diverso, cuando ninguna de las especies componentes puede ser considerada como no mas dominante que cualquiera de las otras especies. Está dado por la siguiente fórmula:

$$\text{diversidad} = \frac{N(N-1)}{\sum n_i(n_i-1)}$$

Para el Índice de Simpson, el valor mínimo es 1; para el Índice de Shannon es valor mínimo es 0. Ambos mínimos indican la ausencia de diversidad, la condición existente en un monocultivo. En teoría, el valor máximo para cada índice es limitado solamente por el número de especies y qué tan uniformemente están distribuidas en el ecosistema. Los ecosistemas naturales relativamente diversos tienen un índice de Simpson de 5 o mayor y un índice de Shannon de 3 o 4.

Los cálculos para los Índices de Mergalef, Simpson y Shannon para los sistemas hipotéticos del Cuadro 16.4, se presentan en el Cuadro 16.5. Los valores

de Shannon y Simpson muestran que un policultivo uniforme de dos cultivos, es más diverso que un policultivo de tres cultivos no-uniformes, teniendo bajos valores de importancia de uniformidad de especies en la diversidad de un agroecosistema.

Descripciones más detalladas de los Índices de Shannon y de Simpson, incluyendo la teoría en la cual están basados y la forma en que pueden ser aplicados, se encuentran en textos de ecología citados al final del Capítulo en la sección de lecturas recomendadas.

Evaluando los Beneficios de la Diversidad de Cultivos Intercalados

En una granja o parcela, una forma de determinar el valor ganado por la mayor diversidad en el sistema de cultivo, será muy útil para ayudar al productor a evaluar las ventajas y desventajas de diferentes arreglos de cultivos. Los índices de diversidad descritos anteriormente pueden cuantificar la diversidad, pero no nos pueden decir cómo esa diversidad se traduce en respuesta, o cuál es la base ecológica de cualquier mejoramiento en cuanto a la respuesta. En los sistemas de cultivo donde dos o más cultivos están muy próximos, es posible que se den varios tipos de interferencia entre las especies (como se ha descrito en los Capítulos 11 y 13), que proveen beneficios en el mejoramiento de la cosecha, reciclaje de nutrientes y otras más.

Además de que los investigadores tienen suficientes evidencias de que los cultivos intercalados proveen ventajas sustanciales en el rendimiento con respecto a los monocultivos, es importante recordar que también hay desventajas en los cultivos intercalados. Hay dificultades prácticas en el manejo de los cultivos intercalados y los aumentos de cosecha pueden deberse a efectos de interferencias adversas. En tales casos no deben usarse argumentos en contra del sistema de cultivos intercalados y en vez de esto, de-

CUADRO 16.5 Valores de los índices de diversidad para los cuatro agroecosistemas hipotéticos

Índice	Monocultivo	Policultivo uniforme de dos cultivos	Policultivo uniforme de tres cultivos	Policultivo no uniforme de tres cultivos
Mergalef	0	0,40	0,81	0,81
Shannon	0	0,30	0,48	0,25
Simpson	1,0	2,01	3,02	1,41

terminar las necesidades de investigación que eviten estos problemas.

El Uso Equivalente de la Tierra

Una herramienta útil para el estudio y evaluación de sistemas de cultivos intercalados, es el Uso Equivalente de la Tierra (UET) (conocido en inglés como Land Equivalent Ratio (UER)). El UET provee una medida de "que todas las cosas han de ser igual", en las ventajas del rendimiento obtenido por sembrar dos o más cultivos intercalados, comparados con los mismos cultivos sembrados en forma separada como monocultivos. El UET nos permite ir más allá de una descripción del patrón de diversidad en un análisis de las ventajas de cultivos intercalados.

El uso equivalente de la tierra es calculado usando la fórmula:

$$LER = \sum \frac{Yp_i}{Ym_i}$$

donde Yp es la cosecha de cada cultivo en un sistema intercalado o en policultivo y Ym es la cosecha de cada cultivo *per se* o en monocultivo. Para cada cultivo (i) una tasa o razón es calculada para determinar el UET parcial para cada cultivo, entonces los UET parciales son sumados para dar el UET total para el sistema intercalado o policultivo. Un ejemplo de cómo calcular el UET se muestra en el Cuadro 16.6.

Un valor de UET de 1.0 significa que "no hay diferencias", indica que no hay diferencia en la cosecha del sistema intercalado o policultivo y la colección de monocultivos. Cualquier valor mayor que 1 indica una ventaja para el intercalado, y es denominado **sobrerrendimiento**. La dimensión del sobrerrendimiento es dada directamente por el valor de UET: por ejem-

plo, un valor de UET de 1.2, indica que el área sembrada en monocultivo necesitaría ser 20% mayor que el área sembrada como sistema intercalado para producir la misma cosecha combinada. Un UET de 2.0 significa que los monocultivos requieren el doble de tierra para producir la misma cosecha que si estuvieran intercalados.

Aplicación e Interpretación del Uso Equivalente de la Tierra

Ya que los valores totales y parciales de UET son proporciones y no valores reales de rendimiento, son útiles para comparar diversas mezclas de cultivos. Es decir, el UET mide el nivel de interferencia de cultivos intercalados en un sistema de cultivo.

Teóricamente, si la característica agroecológica de cada cultivo en la mezcla es exactamente la misma, al sembrarlos juntos deben tener el mismo rendimiento que si se sembraran por separado, donde cada cultivo contribuye con una proporción igual para la cosecha total. Por ejemplo, si dos cultivos similares son sembrados juntos, el UET total debe ser 1,0 y el UET parcial debe ser 0,5 para cada uno. En muchas mezclas, sin embargo, obtenemos un UET mayor que 1,0 y un valor de UET parcial, proporcionalmente mayor que el que se obtendría si cada cultivo fuera agroecológicamente igual a los demás. Un UET total mayor que 1,0 indica la presencia de interferencia positiva entre los cultivos que componen la mezcla, y puede significar también que cualquier interferencia interespecífica existente en la mezcla, no es tan negativa como la que existe en monocultivos. Probablemente, en la combinación de cultivos o mezcla de ellos se evita la competencia o se comparten recursos.

Cuando el UET total es mayor de 1,5, o cuando el UET parcial de al menos un miembro de la combinación es mayor que 1,0 hay una fuerte evidencia de que la interferencia negativa es mínima en las interacciones de cultivos intercalados y que la interferencia positiva permite, al menos a un miembro de la combinación, ser mejor que si estuviera sembrado en monocultivo.

CUADRO 16.6 Datos para representar el cálculo de UET

	Rendimiento en policultivo (Yp), kg/ha	Rendimiento en monocultivo (Ym), kg/ha	UET Parcial $\left(\frac{Yp_i}{Ym_i}\right)$
Cultivo A	1000	1200	0,83
Cultivo B	800	1000	0,80
			$\sum \frac{Yp_i}{Ym_i} = 1,63$

El cultivo intercalado tradicional de maíz-frijol-calabaza, discutido en el Capítulo 15 – con un UET total de 1,97 – constituye un buen ejemplo de esta situación (Cuadro 15.3). El componente maíz del sistema tiene un UET parcial de 1,50, lo que significa que produce mejor en combinación que en monocultivo. La interferencia positiva responsable de este resultado puede ser la conexión mutualística de micorrizas entre el maíz y el frijol, o una modificación del hábitat hecha por la calabaza que estimula la presencia de insectos benéficos y la reducción de las plagas. Aunque el UET parcial del frijol y la calabaza fue muy baja (0,15 y 0,32 respectivamente), su presencia indiscutiblemente fue importante para estimular el rendimiento de maíz.

Cuando el UET total es menor que 1,0, probablemente ocurre interferencia negativa, especialmente si los UET de los cultivos que conforman la mezcla de cultivos disminuyen en forma igual. En este caso la combinación de cultivos provee desventaja en el rendimiento comparado con el monocultivo.

Cuando se analiza la UET total y las UET parciales, puede presentarse confusión sobre qué constituye un ventaja y de qué magnitud es esa ventaja. Para evitar confusiones se requiere reconocer cuáles circunstancias diferentes sugieren criterios para evaluar las ventajas del intercalamiento de cultivos. Existen al menos tres situaciones básicas (Willey, 1981):

1. *Cuando la cosecha combinada de los cultivos intercalados debe exceder la cosecha del cultivo de mayor rendimiento como monocultivo.* Esta situación puede existir cuando se evalúan las combinaciones de cultivos muy similares, tales como mezclas de pastos o forrajes, o mezclas de genotipos de un solo cultivo, tales como multilíneas del cultivo de trigo. En estos casos, las UET parciales no son tan importantes para determinar ventajas, siempre y cuando la UET total sea mayor que 1,0, ya que el requerimiento del productor es principalmente un rendimiento máximo, sin importar de cual sistema de cultivo se obtiene esa ventaja. La ventaja cuantitativa es el grado en el cual la cosecha combinada es aumentada y el UET total excede a 1,0, comparado con la cosecha del monocultivo de mayor rendimiento.

2. *Cuando los cultivos intercalados deben producir el rendimiento máximo del cultivo "principal" más un rendimiento adicional de un segundo cultivo.* Esta situación ocurre cuando la necesidad principal es de algún cultivo básico o de un cultivo de importancia comercial. De aquí que debe haber una ventaja en la combinación de los cultivos intercalados, el UET debe exceder 1,0 y el UET parcial del cultivo principal, debe estar muy cerca de 1,0 o más alto. Con el énfasis en un cultivo clave, las plantas asociadas deben generar alguna interferencia positiva en la combinación. La combinación de cultivos de maíz-frijol-calabaza mencionado anteriormente, es un buen ejemplo de esta situación, porque el productor está interesado principalmente en la cosecha de maíz. Si obtiene alguna cosecha adicional de frijol o de calabaza, aunque la UET parcial sea muy baja, es visto como un bono de cosecha adicional además del maíz. La ventaja cuantitativa es el grado al cual el cultivo principal es estimulado más allá de lo esperado como monocultivo.

3. *Cuando la cosecha combinada de los cultivos en mezcla debe exceder la cosecha de un solo cultivo.* Esta situación ocurre cuando el productor necesita ambos o todos los cultivos que conforman el sistema, especialmente cuando el área que posee para la producción es limitada. Para que la combinación de cultivos sea ventajosa, el UET total debe ser mayor que 1,0, pero ningún cultivo puede sufrir una gran reducción en su UET parcial en el proceso agrícola. Definitivamente no debe haber ninguna interferencia negativa que sea benéfica para la combinación de los cultivos. Esta situación puede presentar problemas en el uso del valor del UET, ya que no siempre está claro en qué proporción de los cultivos solos se puede basar la UET total. Las comparaciones no pueden ser hechas sólo en las proporciones sembradas, porque la interferencia en la situación de cultivos intercalados puede a menudo tener rendimientos muy diferentes a los de la proporción de monocultivo, y esto lleva a tener un sesgo en las UET parciales.

Reconocer situaciones diferentes es importante por dos razones. Primero, ayuda a asegurar que la investigación de una combinación dada esté basada en

prácticas de campo reales. Segundo, puede asegurarse que las ventajas en los rendimientos sean evaluados de una forma real y cuantitativa, que sean apropiados para cada situación. Definitivamente, el patrón o arreglo de la combinación de cultivos que mejor funciona es aquella que contiene tanto el criterio del productor como del investigador.

Para poner cultivos diferentes en una base que los haga más comparables, pueden usarse variables diferentes al rendimiento para calcular el UET (Trenbath 1974). Estas variables incluyen contenido de proteína, biomasa total, contenido de energía, contenido de nutrientes digestibles, o valor monetario. Estos cálculos permiten el uso de indicadores similares para evaluar las diferentes contribuciones que un cultivo puede hacer al agroecosistema.

COLONIZACIÓN Y DIVERSIDAD

Hasta este punto hemos explorado cómo el productor puede aumentar directamente la diversidad sembrando más especies, y cómo él o ella pueden crear condiciones que permitan una diversificación "natural" en un agroecosistema. Hemos ignorado la pregunta de ¿cómo organismos que no son sembrados por el productor entran al sistema y se establecen por sí solos?. Esta pregunta se relaciona tanto con organismos deseables, que son estimulados – tales como depredadores y parásitos de herbívoros, organismos benéficos del suelo y arvenses útiles alelopáticas – como son los organismos no deseables, tales como herbívoros, que el productor desearía excluir del sistema.

Para enfocar la pregunta de ¿cómo un agroecosistema es colonizado por organismos?, es útil pensar que el cultivo es como una "isla" rodeada por un "océano", que los organismos tienen que cruzar para ser parte de la diversidad de especies del agroecosistema. En el sentido ecológico, cualquier ecosistema aislado rodeado por ecosistemas diferenciados es una isla, porque los ecosistemas aledaños establecen límites a la capacidad de los organismos para llegar y colonizar esa isla.

Tomando en cuenta nuestro estudio sobre los procesos de dispersión y establecimiento en el Capítulo 13, exploraremos cómo el estudio de la colonización de islas reales puede ser aplicado para entender la colonización de los agroecosistemas y cómo este proceso está relacionado con la diversidad de los agroecosistemas.

Teoría de la Biogeografía de Islas

El cuerpo de la teoría ecológica relacionada con islas es conocido como biogeografía de islas (MacArthur y Wilson 1967). Esta teoría empieza con la idea de que los ecosistemas de las islas, generalmente están muy aislados de otros ecosistemas similares. La secuencia de eventos que permite a un organismo llegar a una isla, establece una serie de respuestas que guían el desarrollo del ecosistema isla. Una característica de las islas es que muchas de las interacciones que eventualmente determinan el nicho actual de cada organismo después que llega a la isla, son muy diferentes de las condiciones del nicho que tuvo anteriormente ese organismo. Esta situación da al organismo una oportunidad para ocupar más de su nicho potencial, o aún evoluciona características que pueden permitirle expandirlo a un nuevo nicho. Esto es especialmente verdadero en el caso de una isla recientemente formada en el océano – un ambiente muy similar al recientemente perturbado (ejemplo, paso del arado) campo agrícola. La primera plaga que llega a un campo "no colonizado" tiene la oportunidad de llenar rápidamente el nicho potencial, especialmente si es una plaga especialista, adaptada a las condiciones del cultivo presente en ese campo.

La teoría de biogeografía de islas ofrece métodos para predecir el resultado del proceso de diversificación en una isla. Estos métodos consideran el tamaño de la isla, la efectividad de las barreras que limitan la dispersión hacia la isla, la variabilidad de los hábitats en ella, la distancia entre la isla y las fuentes de emigración y el periodo de tiempo en que la isla ha estado aislada.

Manipulaciones experimentales de sistemas de islas (Simberloff y Wilson 1969) y estudios sobre diversidad de islas, proveen las bases para los siguientes principios:

- Mientras más pequeña sea la isla, los organismos requieren más tiempo para encontrarla.
- Mientras más lejos esté la isla de sus colonizadores, los organismos requieren más tiempo para colonizarla.
- Islas más pequeñas y más distantes tienen una flora y fauna menos diversa
- En las islas muchos nichos pueden estar desocupados.
- Muchos de los organismos que llegan a las islas ocupan nichos más amplios que los mismos organismos o similares en tierra firme.

- Los primeros colonizadores generalmente llegan antes que los depredadores y parásitos limitantes, y pueden experimentar un rápido crecimiento al principio.
- Así como la colonización avanza, ocurren cambios en la estructura del nicho de la isla, y puede darse la extinción de los primeros colonizadores.
- Los primeros colonizadores son principalmente organismos de selección "r".

Definitivamente, la teoría puede ser capaz de predecir posibles tasas de colonización y extinción de una isla en particular. Tales predicciones pueden hacer posible el entendimiento de las relaciones entre condiciones ecológicas y la diversidad potencial de especies, y los factores que controlan el establecimiento de un equilibrio entre extinción y la posterior colonización.

Aplicaciones Agrícolas

La similitud entre islas y cultivos permite a los investigadores aplicar la teoría de biogeografía de islas en la agricultura. Se pueden diseñar experimentos donde el cultivo puede estar completamente rodeado por un cultivo diferente, o pequeñas parcelas marcadas en un campo más amplio del mismo cultivo. Uno de los estudios pioneros fue realizado por Price (1976) sobre las tasas de plagas y enemigos naturales que colonizan plantaciones de soya. El estudio fue realizado usando pequeñas parcelas en un campo de soya como islas experimentales; las parcelas estaban rodeadas por un "océano" de soya, con un bosque a un lado y más cultivo de

soya en los otros lados. Se muestrearon parcelas pequeñas durante todo el ciclo del cultivo de soya, las parcelas estaban localizadas a diferentes distancias de varias fuentes de colonización, permitiendo así medir las tasas de llegada, abundancia y diversidad tanto insectos plaga como agentes benéficos de control. Las plagas de más fácil dispersión fueron las primeras en llegar al interior de las parcelas, y fueron seguidas posteriormente por algunos de sus parásitos y depredadores. El equilibrio entre las especies y los individuos, tanto plagas como enemigos naturales, que fue pronosticado por la teoría de biogeografía de islas no fue obtenido, probablemente debido a lo corto del ciclo de vida del cultivo de soya. Este estudio ha estimulado otros estudios de naturaleza similar (Altieri 1995b).

Usando los conceptos desarrollados en la teoría de biogeografía de islas, puede manipularse "la isla" en sistemas de cultivo, de tal manera que se pueda disminuir la llegada de plagas o estimular la presencia de organismos benéficos. Tal enfoque tiene potencial para trabajar con insectos, arvenses y enfermedades. Idealmente, queremos alcanzar el punto donde podamos predecir la estructura de la población y como resultado, usar tal información para determinar el mejor tamaño del área de cultivo, su arreglo en el paisaje, y la distancia entre cultivos semejantes, el periodo efectivo de separación entre campos, y como éste es afectado por los tipos de cultivos y otra vegetación en las áreas entre los cultivos de importancia. Una vez más, estamos tratando con un complejo grupo de factores, pero el potencial para usar la teoría de biogeografía de islas en un contexto agroecológico, es muy amplio.

ESTUDIO DE CASO

Efecto de Bordes de Arvenses en la Colonización de Insectos en una Plantación de Coliflor

La mayoría de los insectos que eventualmente están presentes en un cultivo vienen desde cualquier lugar. Los productores pueden tener algún grado de control sobre este proceso de colonización de insectos – influenciando tanto los tipos de insectos

que se establecen en el campo como el tamaño de sus poblaciones – manejando los alrededores del campo sembrado.

Los bordes sembrados con una especie vegetal en particular, por ejemplo, pueden atraer organismos benéficos, haciendo que ellos colonicen la "isla" del cultivo. Los bordes también pueden repeler plagas, disminuyendo, retrasando o aún previniendo su llegada al cultivo.

En un estudio realizado en la granja de la Universidad de California, Santa Cruz, el estudiante

Octavio Ruíz-Rosado aplicó este principio para el cultivo de coliflor, evaluando cómo un borde relativamente delgado de diferentes arvenses afectó la mezcla de poblaciones de insectos que colonizaron al cultivo (Ruíz-Rosado, 1984). Ruíz-Rosado sembró coliflor con diferentes bordes de arvenses de 0,5 m de ancho, alrededor de las parcelas de coliflor y mantuvo una parcela testigo sin borde de arvenses. Un tipo de borde de arvense fue mostaza silvestre (*Brassica campestris*) y rábano (*Raphanus sativus*), otra fue esparcilla (*Spergula arvensis*) y una tercera fue quelite (*Chenopodium album*).

Las parcelas fueron muestreadas para identificar la colonización de insectos plaga, insectos benéficos y parasitoides. Cada tipo de borde dio

como resultado una población de insectos muy diferente en el cultivo de coliflor. Por ejemplo, el borde de quelite redujo la incidencia del gusano falso medidor (*Trichlopusia ni*) y de la pulga saltana (*Phyllotreta cruciferae*), mientras que los bordes de mostaza silvestre y el rábano aumentaron la presencia de esos insectos plaga. Sin embargo, el rábano y la mostaza silvestre atrajeron también la mayor cantidad de insectos parasitoides benéficos, dando como resultado una mayor tasa de parasitación en áfidos o pulgones.

Estos resultados indican que los bordes de arvenses en los cultivos pueden tener un papel importante en el manejo de insectos plaga. También resalta la importancia del manejo: cada borde puede tener diferente efecto sobre diferentes plagas.



FIGURA 16.6
Mostaza silvestre (*Brassica campestris*) formando una barrera alrededor de "islas" de coliflor. La mostaza puede atraer insectos benéficos y retardar el movimiento hacia el cultivo por insectos plaga herbívoros.

DIVERSIDAD, ESTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD

La diversidad en los agroecosistemas puede tomar muchas formas, incluyendo el arreglo específico de los cultivos en el campo, la forma en que muchos campos están ubicados, y la forma en que diferentes campos constituyen el paisaje agrícola de una región. Con el aumento de la diversidad podemos aprovechar las formas positivas de interacciones entre los elementos del agroecosistema, incluyendo tanto los elementos cultivados como los no cultivados. El reto para el agroecólogo es demostrar las ventajas que se pueden obtener introduciendo diversidad en los sis-

temas de cultivo, incorporando muchos de los componentes de la función del ecosistema que son importantes en la naturaleza, y el manejo de la diversidad a largo plazo.

En parte, conocer este reto significa determinar las relaciones entre los diferentes tipos de diversidad, discutidas en este Capítulo y la estabilidad del agroecosistema en el tiempo. Esta estabilidad debe ser entendida como la resistencia del sistema a cambiar y la elasticidad del sistema en respuesta al cambio. Ya que cada especie en el agroecosistema conlleva algo diferente al proceso que mantiene ambos tipos de estabi-

CUADRO 16.7 Preguntas de investigación relacionadas con la colonización y la teoría de biogeografía de islas

Tipo de organismo	Fuente	Variables de la barrera	Variables de la isla	Pregunta de investigación
Plaga herbívora	Cultivos de alrededor	Depende del tipo de barrera		¿Cuáles son las barreras eficaces contra la dispersión de la plaga hacia el cultivo?
Plaga herbívora	Cultivos de alrededor	Tamaño de la barrera		¿Cuál distancia entre cultivos similares puede controlar mejor la dispersión de una plaga de un campo a otro?
Arvenses no deseables	Cultivos de alrededor	Tipo, tamaño y naturaleza de la barrera (ejemplo rompevientos)		¿Cuáles son las barreras eficaces contra la dispersión de arvenses hacia el cultivo?
Depredadores de herbívoros	Cualquier lugar fuera del sistema		Hábitat para hospedantes alternos	¿Cómo puede ser estimulada la colonización por depredadores?
Organismos que causan enfermedad (patógenos)	Cultivos de alrededor		Tamaño de la isla	¿Es una pequeña isla de cultivo más difícil de localizar para un organismo patógeno?
Arvenses no deseables	Alrededor de los cultivos		Ocupación de nichos	¿Puede un nicho ocupado resistir la invasión de nuevos colonizadores?
Insectos benéficos	Cualquier lugar fuera del sistema	Barreras en franjas alrededor del cultivo		¿Se puede diversificar el área entre cultivos para atraer y retener insectos benéficos?

lidad, una parte importante de la investigación agroecológica está enfocada en el entendimiento de la contribución de cada especie y utilizar este conocimiento para integrar cada especie al sistema en el tiempo y lugar óptimo. Mientras esta integración sucede, aparecen las cualidades emergentes de la estabilidad del sistema, permitiendo la cualidad emergente más importante para el desarrollo de la sostenibilidad.

Los agroecosistemas más sostenibles deben ser aquellos que tienen algún tipo de patrón estructural y de desarrollo, en el cual el sistema es un traslape de niveles de diversidad, mezclando cultivos anuales, perennes, arbustos, árboles y animales; los sistemas más sostenibles deben ser aquellos con diferentes etapas de desarrollo, que ocurren al mismo tiempo como resultado del tipo de manejo aplicado. Tales sistemas deben incorporar labranza mínima que permita la madurez y el desarrollo del subsistema suelo, aún con el más simple sistema vegetal sobre el suelo, o usar cultivo en franjas o a las orillas, para crear mosaicos

de varios niveles de desarrollo y diversidad a lo amplio del paisaje agrícola. Una vez que los parámetros de diversidad están establecidos, el asunto viene a ser la frecuencia e intensidad del disturbio- lo cual exploraremos en el siguiente Capítulo.

Ideas para Meditar

1. Describa una estrategia de manejo de plagas basada en la teoría de biogeografía de islas.
2. Explique una situación en la cual la pérdida de diversidad de un componente del agroecosistema, puede ser compensada por mayor diversidad en algún otro componente.
3. ¿Cuál es la conexión entre diversidad y el evitar riesgos en los agroecosistemas? De ejemplos para apoyar tus puntos de vista.
4. ¿Cuáles son los posibles mecanismos que permiten a un cultivo tener mayor rendimiento en una combinación de cultivos que cuando es sembrado como monocultivo?

5. ¿Cuáles son los principales desestímulos para que los productores cambien a sistemas de cultivo más diversos? ¿Qué tipo de cambios se necesitan para proveer los estímulos necesarios?
6. ¿Cuáles son algunas de las formas de diversificación del agroecosistema que promueven el éxito del Manejo Integrado de Plagas (MIP)?
7. ¿Por qué los agroecosistemas agroforestales y sistemas de cultivos intercalados o combinados son más comunes en el trópico que en las zonas templadas del mundo?

Lecturas Recomendadas

Altieri, M.A. 1994. *Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems*. Food Products Press: New York.

Una revisión del papel de la diversidad vegetal en el manejo de insectos plaga, combinando un análisis de mecanismos ecológicos y el diseño de principios para la agricultura sostenible.

Carlquist, S. 1974. *Island Biology*. Columbia University Press: New York.

Una excelente revisión de los procesos de evolución y biológicos característicos de los ecosistemas de islas.

Carson, R. 1962. *Silent Spring*. Houghton Mifflin: Boston.

El clásico llamado de alerta sobre el impacto negativo de los plaguicidas en la biodiversidad.

Golley, F. B. 1994. *A History of the Ecosystem Concept in Ecology*. Yale University Press: New Haven, CT.

Una revisión completa del desarrollo e importancia del concepto de ecosistema.

Ricklefs, R.E. 1997. *The Economy of Nature*. 4th Edition. W.H. Freeman and Company: New York.

Una revisión del campo de la ecología que enlaza los principios básicos con el entendimiento de los problemas ambientales.

Schulze, E.D. y H.A. Mooney (eds). 1994. *Biodiversity and Ecosystem Function*. Springer Study Edition. Springer-Verlag: Berlin.

Un documento excelente de cómo la pérdida de biodiversidad está afectando globalmente los procesos de ecosistemas.

Smith, R.L. 1995. *Ecology and Field Biology*. 5th Edition. Harper Collins College Publishers: New York.

Un texto de ecología general que provee una revisión de la disciplina ecológica con excelentes aplicaciones de campo.

Wilson, E.O. (ed). 1988. *Biodiversity*. National Academy Press: Washington, D.C.

Una colección de 38 trabajos de autores reconocidos acerca del valor de la biodiversidad y la importancia de conservarla y su restauración.