

BASES AGROECOLOGICAS PARA UNA PRODUCCION AGRICOLA SUSTENTABLE

Agroecological basis for sustainable agricultural production

Miguel Angel Altieri S.¹

En la mayoría de los círculos agrícolas científicos se ha llegado a la percepción general de que la agricultura moderna enfrenta una crisis ambiental. La raíz de esta crisis radica en el uso de prácticas agrícolas intensivas basadas en el uso de altos insumos que conllevan a la degradación de los recursos naturales a través de procesos de erosión de suelos, salinización, contaminación con pesticidas, desertificación, pérdida de la fitomasa y por ende reducciones progresivas de la productividad. La pérdida de rendimientos por plagas en muchos cultivos, a pesar del incremento sustancial en el uso de pesticidas, es un síntoma de esta crisis. En el caso del maíz, en EE.UU., las pérdidas por insectos se elevaron desde 1945 a 1989 de 7 a 13%, a pesar de que se aumentó diez veces el volumen de insecticidas aplicados. Esta baja en los rendimientos a causa de los insectos plaga, se debió, en parte, al cambio de prácticas culturales que favorecieron el monocultivo a expensas de las rotaciones con leguminosas, en gran parte del área dedicada a este cultivo (Pimentel y otros, 1980).

El desarrollo del concepto de agricultura sustentable es una respuesta relativamente reciente a la preocupación por la degradación de los recursos naturales asociada a la agricultura moderna. Este concepto ha provocado mucha discusión y ha promovido la necesidad de realizar ajustes en la agricultura convencional para que ésta se vuelva ambiental, social y económicamente viable y compatible (Edwards y otros, 1990). La idea es desarrollar agroecosistemas con mínima dependencia de insumos agroquímicos y energéticos y que enfatizan las interacciones y sinergismos entre los varios componentes biológicos de los agroecosistemas, mejorando así la eficiencia biológica, económica y la protección del medio ambiente.

A pesar de los numerosos proyectos de investigación, del impulso que se le ha dado al desarrollo tecnológico para lograr la sustentabilidad agrícola, y las muchas lecciones que se han aprendido, el enfoque sigue siendo predominantemente tecnológico, enfatizando, por un lado, la biotecnología y el desarrollo de variedades transgénicas resistentes a herbicidas u otros factores, y por el otro, una agricultura orgánica de sustitución de insumos que promueve un reemplazo de insumos agroquímicos tóxicos y caros, por insumos alternativos (biofertilizantes y biopesticidas) más benignos ambientalmente. Estos enfoques no hacen nada por ir al centro de los problemas ambientales de la agricultura, ni cuestionan la estructura del monocultivo que es la base ecológica de la inestabilidad de la agricultura moderna.

Aún prevalece una visión estrecha que se enfoca sobre las causas específicas que afectan la producción, por lo que la superación del factor limitante, aún con insumos alternativos, continúa siendo el objetivo principal. Esta visión no ha dejado a los investigadores apreciar el contexto y complejidad de los procesos agroecológicos.

En esta búsqueda para reincorporar una racionalidad más ecológica a la producción agropecuaria, los científicos y agricultores han ignorado un punto crucial en el desarrollo de una agricultura más autosuficiente y sostenible: el entendimiento profundo de la naturaleza de los agroecosistemas y los principios que gobiernan su funcionamiento. En este sentido la agroecología se perfila como una disciplina única que delinea los principios ecológicos básicos para estudiar, diseñar, manejar y evaluar agroecosistemas desde un punto de vista integral, incorporando dimensiones culturales, socio-económicas, biofísicas y técnicas.

La agroecología va más allá de una visión unidimensional de los agroecosistemas: su genética, edafología o agronomía, para aunar un entendimiento de los niveles ecológicos y sociales de coevolución, estructura

¹Ingeniero Agrónomo Ph.D., de nacionalidad chilena.
Profesor Asociado, Universidad de California, Berkeley.
Asesor Científico del Consorcio Latinoamericano sobre Agroecología y Desarrollo (CLADES) y Coordinador General del Programa PNUD-SANE (Sustainable Agriculture Networking and Extension).

y función. La agroecología estimula a los investigadores a capitalizar en el conocimiento y habilidades de los agricultores y a identificar el gran potencial que resulta de estructurar la biodiversidad para crear sinergismos benéficos que provean a los agroecosistemas la capacidad de permanecer y aún ¿retornar a un estado original de estabilidad natural?

La producción sostenible se deriva del balance apropiado de suelos, cultivos, nutrientes, luz solar, humedad y de los sinergismos entre organismos existentes. El agroecosistema es productivo cuando este balance y las condiciones óptimas prevalecen y cuando las plantas cultivadas son resistentes para tolerar el estrés y la adversidad. Alteraciones ocasionales se pueden superar con un agroecosistema vigoroso, adaptable y lo suficientemente diversificado para recuperarse una vez que el estrés haya pasado. Ocasionalmente, puede que sea necesario usar medidas más directas (por ejemplo, insecticidas botánicos, fertilizantes alternativos, etc.) para controlar plagas, enfermedades específicas o problemas de suelo, pero la agroecología provee las directrices para un manejo cuidadoso de manera de no dañar irreparablemente al agroecosistema. Simultáneamente, al enfrentamiento con la plaga, enfermedad o deficiencia del suelo, el agroecólogo se esfuerza por restaurar la resistencia y vigor del agroecosistema. Si la causa de la enfermedad, plaga o degradación del suelo, se entiende como desbalance, entonces el objetivo del tratamiento agroecológico es recuperar el balance.

Pero, la protección y producción estable no son el único propósito de la agroecología. De hecho, en el contexto de la agricultura campesina, la sostenibilidad no es posible sin la preservación de la diversidad cultural que ha evolucionado con las agriculturas locales, y una producción estable es sólo posible en el contexto de una organización social que proteja la integridad de los recursos naturales y que nutra la interacción armónica entre el hombre, el agroecosistema y el ambiente.

Es entonces, objetivo fundamental de la agroecología, el permitir a los investigadores, estudiantes de la agricultura y agricultores, desarrollar un entendimiento más profundo de la ecología de los sistemas agrarios, de manera de favorecer aquellas opciones de manejo adecuadas a los objetivos de una agricultura verdaderamente sustentable.

Elementos y requisitos de una agricultura sustentable

La agricultura sustentable se refiere generalmente a un modo de agricultura que intenta proporcionar rendimientos sostenidos a largo plazo, mediante el uso de tecnologías de manejo que integran los componentes del predio de manera de mejorar la eficiencia biológica del sistema. Esto requiere que el sistema agrícola sea considerado como un ecosistema (de aquí el término agroecosistema), por lo que la investigación agrícola no se debiera orientar sólo a obtener altos rendimientos de un cultivo en particular, sino más bien a la optimización del sistema como un todo. Se requiere, además, ver más allá de sólo la producción económica inmediata y considerar la cuestión vital de la estabilidad ecológica y la equidad social (Conway y Barbier, 1990).

Los requisitos básicos de un agroecosistema sustentable son la conservación de los recursos renovables, la adaptación del cultivo al ambiente y el mantenimiento de un nivel alto, pero estable, de productividad. Para enfatizar la sustentabilidad ecológica a largo plazo, más que la productividad a corto plazo, el sistema debe (Altieri, 1987):

- Reducir el uso de energía y recursos.
- Emplear métodos de producción que reestablezcan los mecanismos homeostáticos conducentes a la estabilidad de la comunidad, a la optimización de las tasas de reciclaje de materia orgánica y nutrientes, a la utilización al máximo la capacidad multiuso del sistema y al fortalecimiento de un flujo eficiente de energía.
- Fomentar la producción local de productos alimenticios, adaptados al entorno socioeconómico y natural.
- Reducir los costos, y aumentar la eficiencia y la viabilidad económica de los pequeños y medianos agricultores, fomentando así un sistema agrícola potencialmente resistente y diverso.

El grado en que un agroecosistema aumenta su sustentabilidad dependerá básicamente de un manejo agroecológico que conlleve a la optimización de los seis procesos siguientes (Altieri, 1987; Reijntjes y otros, 1992):

Disponibilidad y equilibrio del flujo de nutrientes: la productividad de un agroecosistema está directamente relacionada con la magnitud del flujo, movilización y conservación de nutrientes, lo que, a su vez, depende del suministro continuo de materia orgánica y la promoción de la actividad biológica del suelo.

Protección y conservación de la superficie del suelo: el manejo de la cubierta vegetal mediante el uso de cultivos de cobertura, "mulch", prácticas de cero labranza, etc., que minimizan la erosión, es una medida eficaz para la conservación del suelo y del agua. La cubierta protectora debe además proteger al suelo de la oxidación u otro deterioro químico. El deterioro físico, debido a la compactación y pérdida de estructura producto de las precipitaciones, puede ser igualmente desastroso reduciendo el potencial productivo. La cobertura permanente o la cubierta con residuos de cultivo provenientes de sistemas manejados apropiadamente, es crucial para mantener el potencial productivo.

Utilización eficiente de los recursos de agua, luz y suelo: es importante reducir al mínimo las pérdidas debidas a los flujos de radiación solar, aire y agua, a través de un manejo del microclima, de la humedad y del control de la erosión.

Mantenimiento de un nivel alto de fitomasa total y residual: con el fin de sostener la biología del suelo y la productividad animal y vegetal es de vital importancia mantener una fitomasa residual alta como fuente de carbono, que aporte energía y facilite la retención de nutrientes. Esto se logra adicionando materia orgánica, con el uso de leguminosas, la integración animal, y removiendo en la cosecha una porción pequeña de nutrientes en relación a la fitomasa total.

Explotación de la adaptabilidad y complementariedad en el uso de recursos genéticos animales y vegetales: esto implica la utilización de variedades y razas autóctonas y rústicas adaptadas a la heterogeneidad ambiental existente y que respondan a un manejo bajo en insumos.

Preservación e integración de la biodiversidad: la eficiencia del reciclaje de nutrientes y la estabilidad frente al ataque de plagas y enfermedades al sistema, dependen de la cantidad y tipo de biodiversidad presente, así como también de su organización espacial y temporal (diversidad estructural), y en especial, de sus interacciones y sinergismos (diversidad funcional). Los agroecosistemas tradicionales, especialmente aquellos en ambientes marginales, poseen a menudo una estabilidad y una elasticidad importante, como resultado del alto nivel de diversidad estructural y funcional que se deriva del uso de policultivos, sistemas agroforestales y sistemas mixtos cultivos-animales.

De todos los procesos mencionados, la mantención de la biodiversidad y de los mecanismos de reciclaje de nutrientes son claves para el diseño de agroecosistemas sustentables (Edward y otros, 1993). Además de proveer la base genética de los cultivos y animales, la biodiversidad presta una infinidad de servicios ecológicos, tales como el reciclaje de nutrientes, la supresión biológica de plagas y enfermedades, el control del microclima local, la detoxificación de compuestos químicos nocivos y la regulación de procesos hidrológicos (Figura 1). Cuando estos servicios naturales se pierden, debido a la simplificación biológica del monocultivo y los pesticidas, los costos ambientales y económicos son importantes. Económicamente los costos en la agricultura incluyen la necesidad de suplir a los cultivos con alto uso de insumos externos, debido a que los agroecosistemas cuando son privados de la diversidad biológica son incapaces de subsidiar su propia fertilidad y de regular las plagas. Cuando ocurren contaminaciones con pesticidas y/o nitratos, los costos envuelven a menudo una reducción en la calidad de vida, debido a la degradación del suelo y de la calidad del agua y los alimentos.

Un agroecosistema sustentable posee características similares a los de un ecosistema natural maduro (Cox y Atkins, 1979):

- alta diversidad de especies y cadenas e interacciones tróficas complejas;
- ciclos minerales relativamente cerrados que capturan nutrientes y evitan su lixiviación;

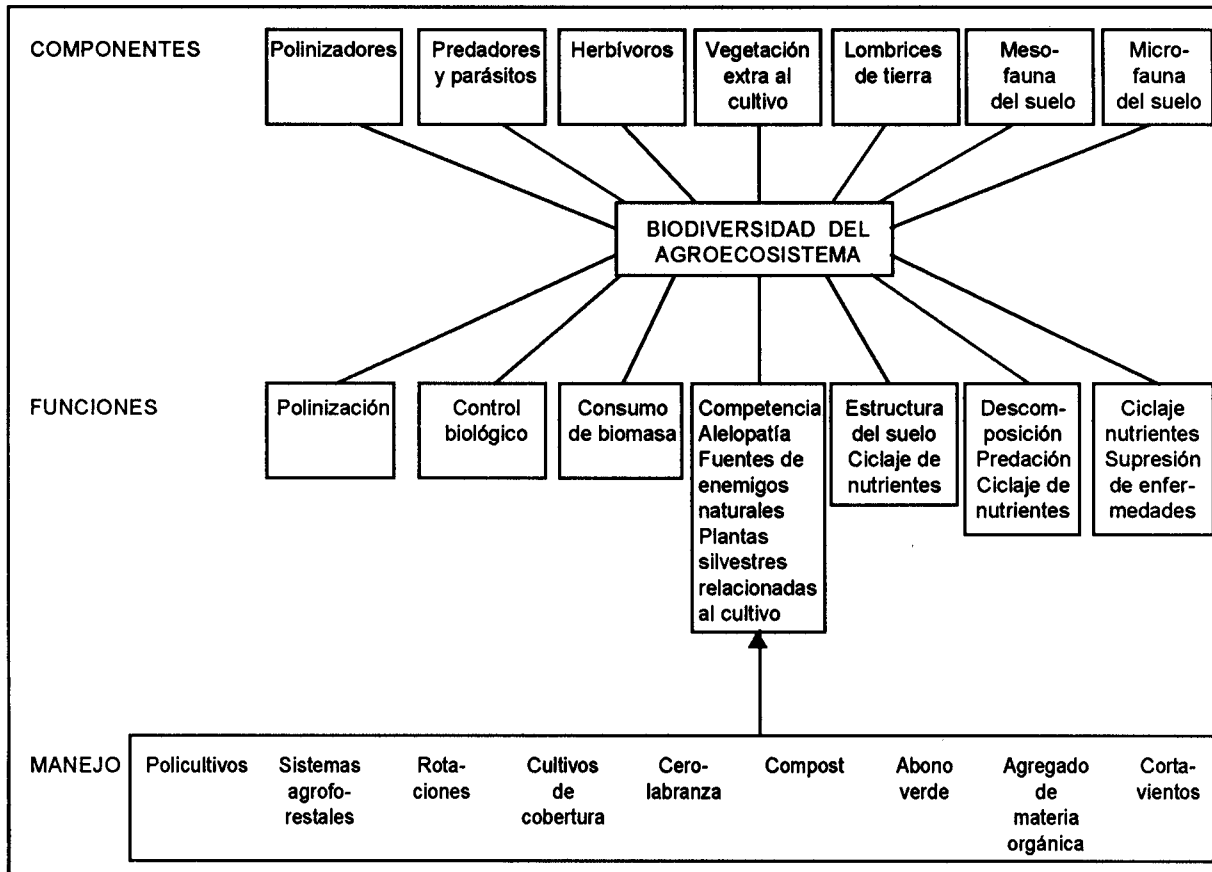


FIGURA 1. Los componentes, funciones y estrategias de mejoramiento de la biodiversidad en agroecosistemas (Altieri, 1992).

FIGURE 1. Components, function and management of biodiversity in agroecosystems.

- una relación entre productividad y fitomasa que decrece, y donde la energía se utiliza más para la mantención del sistema que para la producción de fitomasa adicional;
- mantención de poblaciones estables de insectos, patógenos y malezas que dependen de la diversidad y eficiencia de predadores, parásitos, competidores y antagonistas;
- descomposición de la materia orgánica que depende no sólo de la diversidad de microorganismos e invertebrados, sino también de las complejas interacciones entre los organismos del suelo.

Utilizando estas características y comparando la estructura de un agroecosistema a la de un establo (Edwards y otros, 1993), se puede indicar que, en relación a un agroecosistema sustentable, un sistema convencional de monocultivo carece de un techo funcional (biodiversidad), una fundación sólida (suelo biológicamente activo), pilares firmes (reciclaje de nutrientes) y murallas que aislen efectivamente al sistema (que prevenga pérdidas de nutrientes, entre otros) (Figura 2).

El proceso de conversión agroecológica

Un aspecto importante de comprender, es que la conversión de un sistema convencional de producción basado en el monocultivo (con altas cantidades de insumo), a un sistema que se basa en insumos orgánicos con un manejo diversificado, no es meramente un proceso de eliminación de insumos externos sin un reemplazo compensatorio o manejo alternativo que equilibre el sistema. La agroecología provee las directrices para dirigir los flujos y sinergismos naturales necesarios para sustentar la productividad de un sistema de bajos insumos externos.

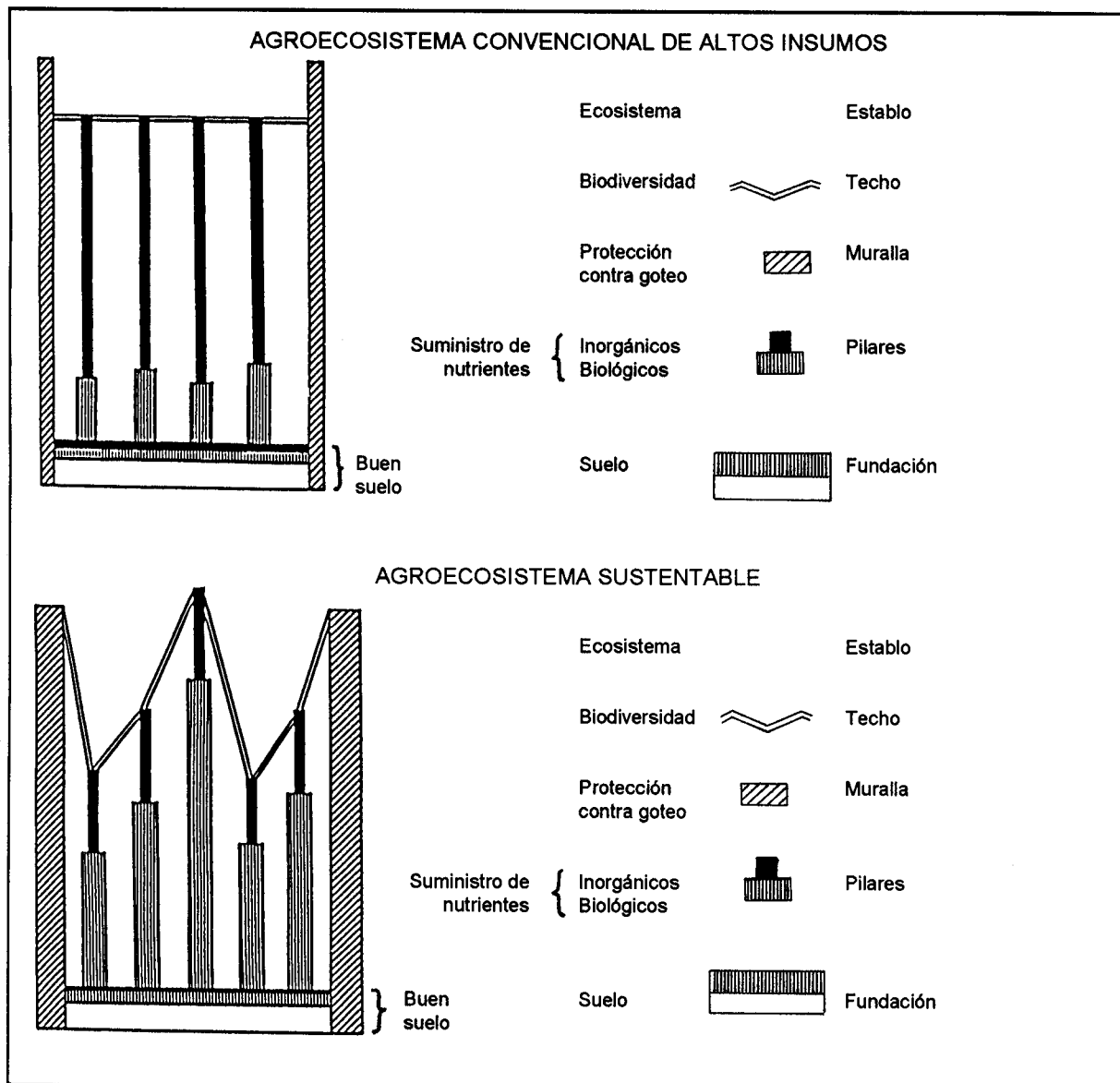


FIGURA 2. Comparación entre un agroecosistema convencional y uno sustentable, utilizando la analogía de la estructura de un establo (modificado de Edwards y otros, 1993).

FIGURE 2. Comparison between a sustainable and a conventional agroecosystem using the analogy of a barn.

Es así como el proceso de conversión de un sistema convencional de altos insumos a otro de bajos insumos externos es de carácter transicional, y está compuesto de cuatro fases (Figura 3):

1. Eliminación progresiva de insumos químicos.
2. Racionamiento del uso de agroquímicos mediante un manejo integrado de plagas (MIP) y nutrientes.
3. Sustitución de insumos agroquímicos, por otros alternativos de baja energía y de carácter biológico.
4. Rediseño diversificado de los sistemas agrícolas con un óptimo equilibrio de cultivos y animales, estimulando sinergismos, de manera que el sistema pueda subsidiar su propia fertilidad, permitir la regulación natural de plagas y optimizar la producción de los cultivos.

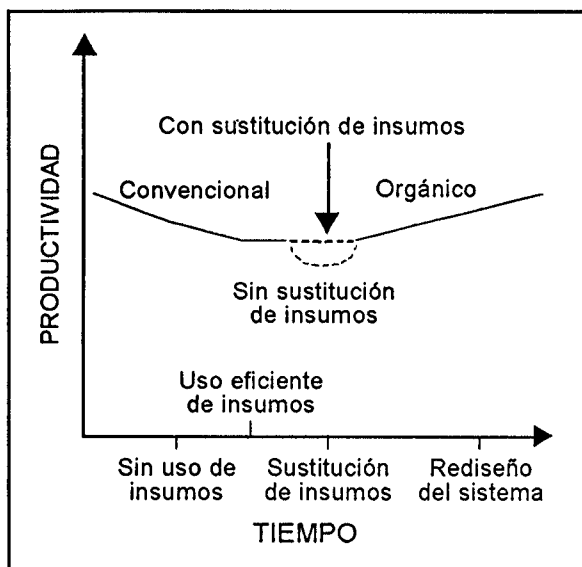


FIGURA 3. Etapas en la conversión agroecológica de sistemas agrícolas convencionales.

FIGURE 3. Stages in the agroecological conversion process.

puesto que ha quedado bien establecido que algunas prácticas, ampliamente incentivadas por los entusiastas de la agricultura orgánica, como son el desmalezado a fuego y la aplicación de insecticidas botánicos de amplio espectro, pueden tener serios efectos colaterales e impactos en el medio ambiente.

Desde el punto de vista económico, la viabilidad de la transición dependerá de la existencia o no de una merma de rendimientos producida durante la transición inicial, y de si los agricultores obtienen un precio especial por sus productos libres de residuos agrotóxicos. El problema, en ocasiones, es que existe un período de transición antes de que se logre la estabilidad de la producción, por lo que la rentabilidad de la inversión en técnicas agroecológicas puede no ocurrir inmediatamente (Figura 4). Este problema se puede obviar asegurando un mercado especial para estos productos y mediante incentivos económicos disponibles a través de políticas agrarias que premien o estimulen la producción agroecológica.

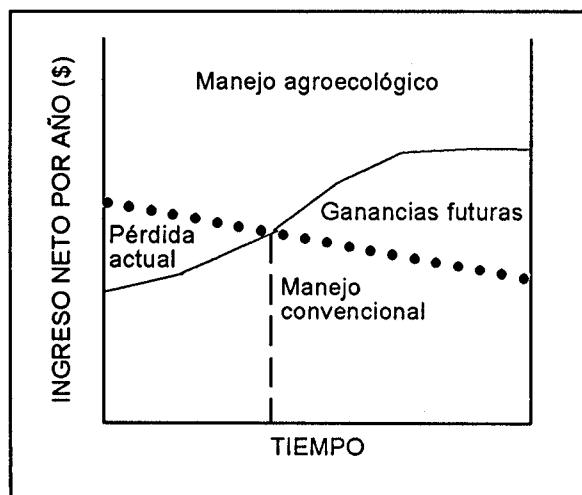


FIGURA 4. Evolución de los flujos de ingresos netos durante la transición a un manejo agroecológico de un sistema.

FIGURE 4. Evolution in the net income flow during the transition towards an agroecological management.

A lo largo de las cuatro fases se asegura mediante el manejo que se den los procesos siguientes:

- Aumento de la biodiversidad en el suelo como también de la vegetación y fauna asociada.
- Aumento de la producción de fitomasa y el contenido de materia orgánica del suelo.
- Disminución de los niveles de residuos de plaguicidas y de las pérdidas de nutrientes y agua.
- Establecimiento de relaciones funcionales entre los diversos componentes agrícolas.
- Planificación óptima de secuencias y combinaciones de cultivos y uso eficaz de los recursos disponibles a nivel local.

Es importante señalar que los procesos de conversión toman de uno a cinco años, dependiendo del nivel de artificialidad y/o degradación del sistema original. Además, no todos los intentos de sustitución de insumos son ecológicamente apropiados,

Restaurando la biodiversidad de los agroecosistemas

La evidencia experimental y la literatura agroecológica, cada vez más, confirman la importancia de la mantención de la biodiversidad y de los mecanismos mediante los cuales ésta estabiliza los agroecosistemas. Las consecuencias de la reducción de la biodiversidad son más evidentes, en el campo del manejo de plagas que en ninguna otra situación. La inestabilidad de los agroecosistemas se manifiesta a través del aumento de la mayoría de los problemas de plagas que se han ligado a la expansión de monocultivos a expensas de la vegetación natural (Altieri y Letourneau, 1982). En los agroecosistemas modernos, la evidencia experimental sugiere que la biodiversidad puede ser utilizada para mejorar el manejo de plagas (Andow, 1991). Muchos estudios han demostrado que es posible estabilizar las poblaciones de insectos en los agroecosistemas mediante el diseño y la

construcción de arquitecturas vegetales que mantengan poblaciones de enemigos naturales o que posean efectos disuasivos directos sobre los herbívoros-plaga. Los monocultivos son ambientes en los que es difícil inducir un control biológico eficiente, producto de las prácticas culturales perturbantes a menudo utilizadas y debido a que estos sistemas no poseen los recursos adecuados para que los enemigos naturales puedan actuar en forma efectiva. Los sistemas de cultivo diversificados, ya contienen ciertos recursos específicos para los enemigos naturales provistos por la diversidad de plantas, y generalmente, no han sido alterados con pesticidas (especialmente cuando son manejados por agricultores pobres en recursos, quienes no pueden utilizar tecnologías de alta inversión). Ellos son también más fáciles de manipular. Así, al reemplazar los sistemas simples por sistemas diversos o agregar diversidad a los sistemas existentes, es posible ejercer cambios en la diversidad del hábitat que favorecen la abundancia de los enemigos naturales y su efectividad (Altieri y Letourneau, 1982; Powell, 1990). Al estructurar un agroecosistema, se debería:

- proveer de huéspedes/presas alternativas en momentos de escasez de la plaga huésped,
- proporcionar de alimentación (polen y néctar) a los parasitoides y depredadores adultos,
- facilitar sitios de refugio para la invernación y nidificación de enemigos naturales, etc.,
- mantener poblaciones aceptables de la plaga por períodos prolongados de manera de asegurar la sobrevivencia continuada de los insectos benéficos.

Aunque los herbívoros-plaga pueden variar bastante en su respuesta a la distribución, abundancia y dispersión de los cultivos, la mayoría de los estudios agroecológicos muestran que los atributos estructurales (por ejemplo, combinación espacial y temporal) y de manejo (por ejemplo, diversidad de cultivos, niveles de insumos, etc.) influyen a la dinámica poblacional de los herbívoros. Algunos de estos atributos están relacionados con la biodiversidad, y la mayoría son sensibles al manejo (por ejemplo, secuencias de cultivos y asociaciones, diversidad de malezas, diversidad genética, etc.).

El efecto resultante específico de la estrategia a utilizar dependerá de las especies de herbívoros y sus enemigos naturales asociados, así como de las propiedades de la vegetación, de la condición fisiológica del cultivo, o la naturaleza de los efectos entomológicos directos de una especie particular de planta. Además, el éxito de las medidas de estímulo puede ser influenciado por la escala a la cual éstas son implementadas (por ejemplo, tipo de campo, unidad agrícola o región), ya que el tamaño del campo, la composición vegetal dentro y alrededor de éste y su nivel de aislamiento (por ejemplo, distancia desde la fuente de colonizadores), afectarán a las tasas de inmigración y emigración y al tiempo efectivo de acción de un enemigo natural particular, en un campo de cultivo (Altieri, 1992).

Tal vez una de las mejores estrategias para incrementar la efectividad de los depredadores y parasitoides es la manipulación de recursos alternativos de alimentación (por ejemplo, huéspedes/presas y polen/néctar alternativos) (Southwood y Way, 1970). Aquí no es solamente importante que la densidad del recurso alternativo sea alta para influir a las poblaciones de enemigos, sino también, que la distribución espacial y temporal del recurso sean adecuadas. La manipulación adecuada del recurso alternativo debería permitir que los enemigos colonicen el hábitat más temprano que la plaga y que con frecuencia encuentren el recurso distribuido uniformemente en el campo, incrementando, así, la probabilidad del enemigo de permanecer en el hábitat y reproducirse. Ciertas disposiciones de policultivos aumentan y otras disminuyen la heterogeneidad espacial de recursos alimentarios específicos; así, una especie particular de enemigo natural puede ser más o menos abundante en un policultivo específico. Estos efectos y respuestas pueden sólo ser determinados experimentalmente a través de un rango completo de agroecosistemas. La tarea es sin duda abrumadora, ya que las técnicas de estímulo deben ser necesariamente específicas para cada sitio (Altieri y Letourneau, 1982).

En la literatura existen numerosos ejemplos de experimentos que documentan que la diversificación de sistemas de cultivo, a menudo, lleva a reducir las poblaciones de herbívoros. Los estudios sugieren que mientras más diverso sea el ecosistema, se desarrollan mayor cantidad de interacciones entre componentes bióticos para promover una mayor estabilidad en las poblaciones de insectos. Es claro, sin embargo, que la estabilidad de las poblaciones de insectos depende no solamente de su diversidad trófica, sino también de la capacidad de respuesta funcional (densidad dependiente) de los niveles tróficos (Southwood y Way,

1970). En otras palabras, la estabilidad dependerá de la precisión de la respuesta de cualquier nivel trófico, a un aumento de la población en un nivel inferior.

Aunque la mayoría de los experimentos han documentado tendencias de poblaciones de insectos en hábitat simples versus complejos, pocos se han concentrado en dilucidar la naturaleza y dinámica poblacional de las relaciones tróficas entre plantas y herbívoros, y los enemigos naturales en agroecosistemas diversificados. Algunas de las líneas de estudio que se han desarrollado son (Altieri, 1992):

Estudios de interacciones cultivos-malezas-insectos: la evidencia indica que ciertas malezas influyen en la abundancia y diversidad de insectos herbívoros y sus enemigos naturales asociados en sistemas de cultivos. Ciertas malezas (principalmente Umbelliferae, Leguminosae y Compositae) juegan un importante rol ecológico al acoger a un complejo de artrópodos benéficos que ayudan en el control de las poblaciones de plagas.

Dinámica de insectos en policultivos anuales: numerosas evidencias sugieren que los policultivos sostienen una menor carga de herbívoros que los monocultivos. Un factor que explica esta tendencia es que las poblaciones de enemigos pueden persistir relativamente más estables en los policultivos, debido a la continua disponibilidad de recursos alimenticios y de variados microhábitat. La otra posibilidad es que los herbívoros especializados son más propensos a encontrar y permanecer en cultivos puros, los cuales proveen de recursos concentrados y condiciones físicas homogéneas.

Herbívoros en sistemas de cultivos perennes: la mayoría de estos estudios han explorado los efectos de la manipulación de la cubierta vegetal del suelo en huertos frutales sobre los insectos plaga y sus enemigos asociados. Los resultados indican que los huertos frutales con abundante flora basal presentan una menor incidencia de insectos plaga que aquellos huertos limpios, principalmente, por la mayor abundancia y eficiencia en los primeros, de los depredadores y parasitoides. En algunos casos, la cubierta vegetal del suelo afecta directamente a las especies de herbívoros que discriminan entre árboles con o sin cubierta vegetal en sus bases.

Los efectos de la vegetación adyacente: estos estudios han documentado la dinámica poblacional de plagas de insectos colonizadores que invaden los campos de cultivo desde la vegetación de los bordes, especialmente cuando ésta está relacionada botánicamente con el cultivo. Un gran número de estudios documentan la importancia de la vegetación silvestre contigua en proveer alimentación alternativa y hábitat a los enemigos naturales que se desplazan hacia los cultivos cercanos.

La literatura disponible sugiere que el diseño de estrategias de manejo de la vegetación debe incluir el conocimiento y consideración de (1) la disposición de los cultivos en el tiempo y el espacio, (2) la composición y abundancia de la vegetación no cultivada dentro y alrededor de los cultivos, (3) el tipo de suelo, (4) el ambiente circundante, y (5) el tipo e intensidad de manejo. La respuesta de las poblaciones de insectos a las manipulaciones ambientales depende de sus grados de asociación con uno o más de los componentes vegetales del sistema. El alargamiento de la duración del cultivo, o la planificación de cultivos en secuencia temporal o espacial, pueden permitir que los agentes naturales de control biológico mantengan sus poblaciones sobre los huéspedes o presas alternativas y así persistir en los ambientes agrícolas a través del año.

Como los sistemas agrícolas en una región son manejados en un rango de inversión energética, niveles de diversidad de cultivos y estados de desarrollo, ocurrirán variaciones en la dinámica de los insectos, las cuales pueden ser difíciles de predecir. Sin embargo, basados en las teorías ecológica y agronómica actuales, se puede esperar un bajo potencial de plagas en los agroecosistemas que exhiban las siguientes características (Altieri, 1992):

- Alta diversidad a través de mezclas de plantas en el tiempo y el espacio.
- Discontinuidad del monocultivo en el tiempo mediante rotaciones, uso de variedades de maduración temprana, uso de períodos sin cultivo (barbechos naturales o mejorados) o períodos preferenciales sin hospederos, etc.

- Campos pequeños y esparcidos en un mosaico estructural de cultivos adyacentes y tierra no cultivada que proporcione refugio potencial y alimentación alternativa para los enemigos naturales. Las plagas también pueden proliferar en estos ambientes, dependiendo de la composición de especies de plantas. Sin embargo, la presencia de bajos niveles poblacionales de plagas y/o huéspedes alternativos, puede ser necesaria para mantener a los enemigos naturales en el área.
- Granjas con un componente dominante de cultivos perennes. Los huertos frutales son considerados ecosistemas semi-permanentes y más estables que los sistemas de cultivos anuales. Los huertos frutales sufren menos alteraciones y se caracterizan por una mayor diversidad estructural, especialmente si se estimula una diversidad de la flora en la superficie del suelo.
- Altas densidades de cultivos o presencia de niveles tolerables de ciertas malezas.
- Alta diversidad genética como resultado del uso de mezclas varietales o de varias líneas del mismo cultivo.

Al considerar varias de las características espaciales, temporales y varietales de sistemas de cultivo, Litsinger y Moody (1975) sugirieron las implicancias de varios esquemas de manejo de cultivos en la supresión de plagas (Figura 5). Estas generalizaciones pueden servir en la planificación de las estrategias de manejo de la vegetación en los agroecosistemas; sin embargo, ellas deben considerar las variaciones locales de clima, geografía, cultivos, vegetación, complejos de plagas, etc., las cuales podrían aumentar o disminuir el potencial para el desarrollo de las plagas bajo algunas condiciones de manejo de la vegetación. La selección del componente de especie de planta puede ser también crítica. Se necesitan estudios sistemáticos sobre la "calidad" de la diversificación vegetal en relación a la abundancia y eficiencia de los enemigos naturales. Como fuera señalado por Southwood y Way (1970), lo que parece importar es la diversidad "funcional" y no la diversidad *per se*. Los estudios mecanísticos para determinar los elementos claves de las mezclas de plantas que alteran la invasión de plagas y favorecen la colonización y el crecimiento poblacional de los enemigos naturales permitirá la planificación más precisa de los esquemas de manejo de cultivos y aumentará las posibilidades de efectos benéficos más allá de los niveles actuales.

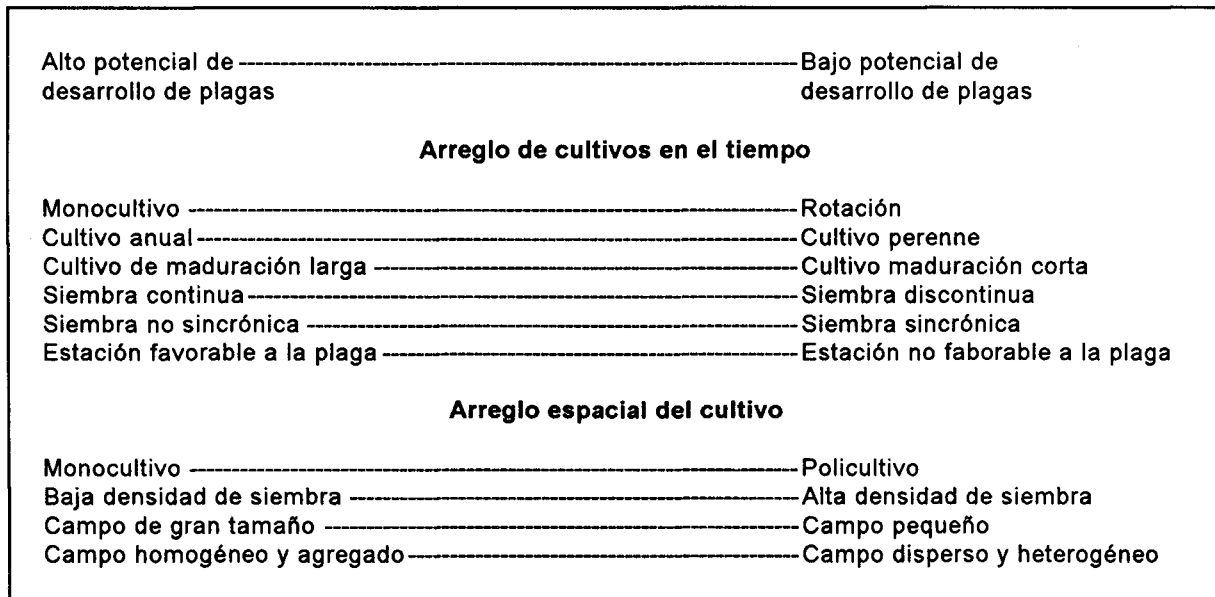


FIGURA 5. Potencial de desarrollo de plagas en agroecosistemas de acuerdo a arreglo temporal y espacial de cultivos (según Litsinger y Moody, 1976).

FIGURE 5. Pest potencial in agroecosystems according to temporal and spatial design.

Evaluando el estado ecológico y la sustentabilidad de los agroecosistemas

La mayoría de las definiciones de sustentabilidad incluyen por lo menos tres criterios:

- Mantenimiento de la capacidad productiva del agroecosistema.
- Preservación de la diversidad de la flora y la fauna.
- Capacidad del agroecosistema para automantenerse y autorregularse.

Una característica importante de la sustentabilidad es la capacidad del agroecosistema para mantener un rendimiento que no decline a lo largo del tiempo, dentro de una amplia gama de condiciones. La mayoría de los conceptos de sustentabilidad requieren, a la vez, un rendimiento constante y la prevención de la degradación ambiental. Estas dos demandas, a menudo se perciben como si fueran mutuamente incompatibles, ya que la producción agrícola demanda un nivel de utilización de recursos mientras que la protección ambiental requiere un cierto nivel de conservación (Conway y Barbieri, 1990).

El desafío para la evaluación de la salud de los agroecosistemas, es asegurar un monitoreo equilibrado de la productividad y de la integridad ecológica del sistema. Históricamente, la evaluación de los sistemas agrícolas se ha centrado en la cuantificación de la producción de alimentos y fibras, y, hasta cierto punto, en el estado y la condición del suelo, del agua y de los recursos relacionados. El monitoreo del estado de los componentes o procesos biológicos esenciales de los agroecosistemas ha sido hasta el momento extremadamente deficiente. En un intento por desarrollar un planteamiento más holístico para evaluar la condición agroecológica de los agroecosistemas, es posible identificar tres parámetros de evaluación de agroecosistemas, expresiones cuantificadas del cambio ambiental. Estos parámetros son:

Sustentabilidad: capacidad para mantener el nivel de productividad de los cultivos a través del tiempo, sin arriesgar los componentes estructurales y funcionales de los agroecosistemas.

Contaminación de recursos naturales: alteración de la calidad del aire, agua y suelo causada por las prácticas agrícolas, los insumos químicos o productos de los agroecosistemas.

Calidad del paisaje agrícola: las diversas formas en que los modelos agrícolas de uso de la tierra modifican el entorno e influyen en los procesos ecológicos.

Los indicadores que se consideran normalmente para el monitoreo agroecológico y su asociación con los parámetros de evaluación se muestran en el Cuadro 1. De éstos destacan seis indicadores para la evaluación inicial (Cuadro 1):

CUADRO 1. Asociación entre los parámetros de evaluación y los indicadores (Meyer y otros, 1992)

TABLE 1. Association between evaluation parameters and indicators

Indicador	Sustentabilidad	Contaminación de los recursos naturales	Calidad del paisaje agrícola
Productividad del cultivo	x		
Productividad del suelo	x	x	
Capacidad de retención de nutrientes	x		
Erosión del suelo	x		x
Contaminación	x	x	
Componentes microbianos	x	x	
Uso de la tierra	x		x
Población de la fauna silvestre			x
Diversidad y abundancia de insectos benéficos	x		x
Prevalencia de plagas y salud del cultivo	x		
Estado de especies biomonitoras		x	
Cantidad y calidad del agua para riego	x	x	
Uso de agroquímicos	x	x	
Diversidad genética y estado de la biodiversidad	x		x

Productividad del cultivo: este indicador se evalúa estimando la eficiencia con que los insumos logran el rendimiento deseado, contabilizando además de los insumos, los costos ambientales y productos beneficiosos o perjudiciales.

Productividad del suelo: para un recurso renovable como el suelo, que necesariamente se degrada al extraerle su fertilidad, el nivel de uso máximo sustentable (MSU) es equivalente a su tasa de renovación. La curva en la Figura 6 describe la relación general entre el MSU del suelo agrícola y la profundidad del suelo. Mientras la profundidad del suelo sea mayor que la requerida por las raíces de los cultivos y otras plantas, la pérdida del suelo tiene poco o ningún efecto negativo sobre la productividad, no obstante, la productividad disminuye cuando la profundidad del suelo es inferior a este umbral. Los costos de pérdida del suelo por la erosión se tornan excesivos a medida que el suelo se adelgaza más allá del umbral (llamado punto crítico C*).

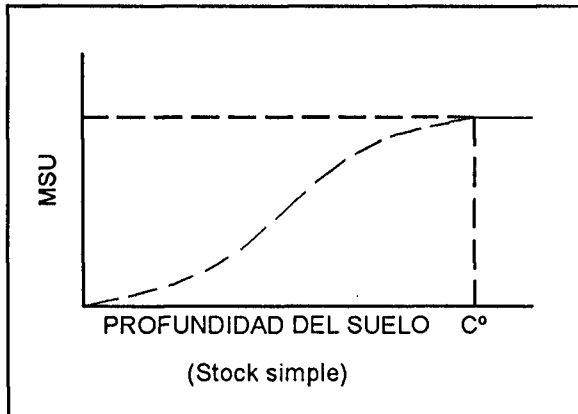


FIGURA 6. Relación general entre el nivel máximo sustentable de uso del suelo (MSU) y su profundidad.

FIGURE 6. General relationship between the maximum sustainable use of soil and its depth.

En términos prácticos, la productividad del suelo estará determinada por la capacidad para retener y reciclar nutrientes, la biota del suelo, el grado de contaminación y la tasa de erosión.

Cantidad y calidad del agua para riego: se destacan dos aspectos: (1) los impactos de la cantidad de agua y su calidad sobre la condición ecológica de los agroecosistemas regados, y (2) los impactos del manejo del agroecosistema sobre la cantidad y calidad del agua.

Abundancia y diversidad de insectos benéficos: la presencia y eficiencia de predadores, parásitos y agentes polinizantes.

Uso de productos químicos en la agricultura: efectos sobre la producción de los cultivos, la biodiversidad funcional y los ecosistemas adyacentes.

Diversidad genética: mantención de la diversidad genética autóctona versus exótica y las tasas de pérdida genética del germoplasma local.

Utilizando un conjunto de indicadores biofísicos y socioeconómicos es posible evaluar y comparar tanto los atributos como la contribución potencial para la sustentabilidad, en agroecosistemas bajo manejo convencional versus aquellos con un manejo agroecológico. Aunque es difícil categorizar y cuantificar muchos aspectos de la sustentabilidad agrícola, en el Cuadro 2 se ofrecen algunos valores cualitativos para diferentes atributos, con lo cual es posible visualizar las ventajas de los sistemas alternativos (NRC, 1989).

Los científicos del suelo han desarrollado una metodología para la evaluación de la sustentabilidad de éste. El primer paso es identificar los procesos degradativos actuales o potenciales del suelo, y las propiedades de éste que serán afectadas por procesos como los de erosión, compactación, degradación química y biológica, salinización, etc. (Cuadro 3). El segundo paso consiste en reevaluar estos indicadores afectados por los procesos modificadores del suelo, de acuerdo al tipo de uso del suelo y a los sistemas de cultivo usados. Es claro que el tipo y tasa de degradación están determinados por el uso y manejo del suelo. Esto es importante para identificar las prácticas de conservación ("mulching", cultivos de cobertura, aplicación de materia orgánica, etc.) que sirven para mejorar y proteger la estructura del suelo, su biología, su capacidad de retención de humedad, etc., así como los diferentes mecanismos involucrados en el reciclaje de los nutrientes (Cuadro 4).

CUADRO 2. Comparación de atributos biofísicos, sociales y económicos entre agroecosistemas convencionales y alternativos

TABLE 2. Comparison of biophysical, social and economic attributes of conventional and alternative agroecosystems

Atributos	Agroecosistema	
	Convencional	Alternativo
Biofísicos		
Capacidad de reciclaje de nutrientes	B-M	M-A
Capacidad de conservación de agua y suelo	B	M-A
Nivel de biodiversidad	B	M-A
Estabilidad frente a plagas y enfermedades	B	M-A
Almacenaje de carbono	B-M	A
Sociales		
Salud y nutrición	B-M	M-A
Viabilidad cultural	B-M	M-A
Aceptabilidad política	M-A	M-A
Equidad	B-M	M-A
Económicos		
Dependencia en insumos externos	A	B
Empleo	A ¹	M
Ingreso	A ²	M

B: bajo, M: medio, A: alto.

¹Estacional.

²No contabiliza externalidades ni impacto sobre recursos naturales.

CUADRO 3. Indicadores de la sustentabilidad influenciada por proceso de degradación del suelo (Lal, 1994)

TABLE 3. Indicators of sustainability influenced by soil degradation processes

Procesos	Indicadores del suelo afectados
Erosión acelerada	Carbón orgánico, profundidad del suelo, agua disponible, capacidad nutricional.
Compactación	Densidad del suelo, porosidad, tasa de infiltración.
Degradación química	Reducción en CIC, agotamiento de nutrientes, eliminación biológica.
Acidez	Bajo de pH, decremento en situación de bases, concentración de Al.
Salinización	Incremento en conductibilidad eléctrica, cambio en color del suelo, incremento en sales solubles totales.
Alcalinización	Decremento en infiltración, cambio de color el suelo debido a salinización del carbono.
Degradación biológica	Reducción en contenido de materia orgánica y biomasa de carbono, reducción de biodiversidad (poblaciones de lombrices, etc.).

CUADRO 4. Principios básicos y opciones tecnológicas para mejorar el uso sustentable de recursos del suelo (Lal, 1994)

TABLE 4. Basic principles and technological options to improve the sustainable use of soils

Estrategia	Opciones tecnológicas
Mejorar estructura del suelo	Cultivos de cobertura, "mulching", labranza de conservación.
Elevar contenido de materia	Aplicación de estiércol, desechos orgánicos, abonos verdes y labranza de conservación.
Reducir compactación	Tracción animal, labranza mínima, uso de eco-arados.
Mejorar reciclaje de nutrientes	Aplicación de materia orgánica, agroforestería, cultivos múltiples, integración animal.
Manejar la acidez del suelo	Uso de variedades tolerantes, aplicación de cal, adición materia orgánica y enmiendas.
Manejo de la salinidad y alcalinidad	Riegos especiales para mejorar lixiviación de sales, aplicación de enmiendas, uso de cultivos apropiados.
Mejorar fertilidad	Activación biológica del suelo, reciclar desechos orgánicos, integración animal.

Uno de los pocos intentos que se han hecho para cuantificar la economía de la sustentabilidad agrícola es el estudio de Faeth y otros (1991), mediante el cual se comparó la economía de los sistemas de producción alternativos y convencionales en Pensilvania y Nebraska cuando los recursos naturales son contabilizados, en especial, la depreciación del suelo. Los autores utilizaron un método para la contabilización de recursos naturales que, al utilizar datos económicos, puede proporcionar mediciones cuantitativas de la sustentabilidad. La productividad del suelo, la utilidad del predio, los impactos ambientales regionales y los costos fiscales son todos incluidos dentro de este esquema de contabilidad de los recursos naturales.

Los Cuadros 5a y 5b comparan el ingreso agrícola neto y el valor económico neto por acre, para la mejor rotación convencional de maíz-soya de Pensilvania, con y sin la contabilidad del recurso natural suelo. El Cuadro 5a, en su primera columna, muestra un análisis financiero convencional del ingreso agrícola neto. El margen bruto de operación, es decir las ventas menos los costos de producción, aparecen en la primera columna (US\$ 45). Debido a que los análisis convencionales no consideran la degradación de los recursos naturales, el margen bruto y el ingreso de operación agrícola neto son los mismos. Los subsidios gubernamentales (US\$ 35) se añaden para obtener así el ingreso neto (US\$ 80).

Cuando se incluye la contabilidad de los recursos naturales (Cuadro 5a, segunda columna), el margen bruto de operación se reduce por la rebaja atribuible a la depreciación del suelo (US\$ 25), para obtener un ingreso agrícola neto de US\$ 20. La rebaja por depreciación es una estimación del valor actual de pérdidas de ingresos futuros, debido al impacto de la producción de cultivos sobre la calidad del suelo. El mismo pago gubernamental se añade para determinar el ingreso agrícola neto (US\$ 55).

El valor económico neto (Cuadro 5b) descuenta US\$ 47 a manera de ajuste por los costos ambientales fuera del predio (como la sedimentación, los impactos sobre la recreación, zonas pesqueras y usuarios aguas abajo). El valor económico neto incluye también la rebaja por depreciación del suelo dentro del predio, pero excluye los pagos gubernamentales. Los agricultores no "internalizan" los costos fuera del predio directamente, pero éstos son, no obstante, costos económicos reales atribuibles a la producción agrícola y deberían considerarse al calcular el valor económico neto. Los pagos de subsidios por el contrario, son una transferencia de los contribuyentes a los agricultores, no un ingreso generado por la producción agrícola y, por lo tanto, se excluyen de los cálculos del valor económico neto. En este ejemplo, cuando se realizan estos ajustes, una ganancia de US\$ 80 en contabilidad financiera convencional pasa a ser una pérdida de US\$ 27 en una contabilidad económica ecológicamente más correcta.

CUADRO 5a. Evaluación económica intrapredio de un sistema convencional con y sin contabilidad de recursos naturales (Faeth y otros, 1991)

TABLE 5a. On farm economic evaluation of a conventional system with and without natural resource accounting

	Ingreso neto agrícola (US\$ acre/año)	
	Sin contabilidad de recursos naturales	Con contabilidad de recursos naturales
Margen bruto operacional	45	45
Depreciación del suelo	-	25
Ingreso neto agrícola operacional	45	20
Subsidio gubernamental de productos	35	35
Ingreso agrícola neto	80	55

CUADRO 5b. Evaluación económica de un sistema convencional con y sin contabilidad de recursos naturales, considerando los impactos fuera del predio

TABLE 5b. Economic evaluation of a conventional system with and without natural resource accounting considering off-from impacts

	Ingreso neto agrícola (US\$ acre/año)	
	Sin contabilidad de recursos naturales	Con contabilidad de recursos naturales
Margen bruto operacional	45	45
Depreciación del suelo	-	25
Ingreso neto agrícola operacional	45	20
Costos fuera del predio	-	47
Valor económico neto	80	(27)

CONCLUSIONES

No hay duda de que la intensificación de la agricultura es una prueba crucial de la elasticidad de la naturaleza. No sabemos cuánto tiempo más el hombre puede seguir aumentando la magnitud del subsidio y la utilización de tan altos insumos, sin antes agotar los recursos naturales y causar una mayor degradación ambiental. Antes de que alcancemos este punto crítico producto de la contaminación creciente, deberíamos esforzarnos para diseñar agroecosistemas que se comparen en estabilidad y productividad con los ecosistemas naturales (Cox y Atkins, 1979). Este desafío es lo que constituye la fuerza impulsora de la agroecología.

Como se ha enfatizado en este artículo, la agroecología es un enfoque sistémico de la agricultura, que es más sensible a los ciclos naturales y a las interacciones biológicas que los métodos convencionales de análisis agrícola. Los sistemas alternativos de agricultura, tratan de integrar los aspectos positivos de la interacción biológica entre cultivos, plagas y predadores en sistemas biodiversificados. Sin embargo, los mecanismos específicos de muchos de estos fenómenos e interacciones necesitan aún de mayor estudio. Por ejemplo, se sabe poco en relación a qué tipo y cuánta biodiversidad es necesaria para estabilizar un agroecosistema. En general, está bastante claro el comportamiento de algunos de los componentes de los sistemas alternativos, pero no se conoce bien el cómo funcionan estos sistemas como un todo.

Las investigaciones especializadas que se han centrado en un aspecto de una práctica agronómica específica, o en una enfermedad o plaga de un cultivo particular, no han sido capaces de generar soluciones a problemas que afectan al predio como un todo. En contraste, la investigación agroecológica incluye la interacción y la integración de todas las actividades prediales y considera metas más globales de manejo de recursos, productividad, calidad ambiental y rentabilidad.

Cuando se examinan los problemas que confrontan el desarrollo y la adopción de agroecosistemas sustentables, resulta imposible separar los problemas biológicos y socioeconómicos de la práctica agrícola. Muchas veces las complicaciones sociales y las limitantes políticas, más que los problemas técnicos, se transforman en barreras para cualquier transición desde sistemas convencionales de altos insumos a sistemas agrícolas que consumen poca energía y que conservan el medio ambiente.

Una estrategia para lograr una productividad agrícola sostenida tendrá que hacer mucho más que simplemente modificar las técnicas tradicionales. Una estrategia exitosa será el resultado de enfoques novedosos de diseño de agroecosistemas que integren el manejo en base a recursos regionales y que operen dentro del marco de condiciones ambientales y socioeconómicas imperantes. Las selecciones tendrán que basarse en la interacción de factores como: especies de cultivos, rotaciones, nutrientes y humedad del suelo, temperatura, plagas, cosecha y otros procedimientos agronómicos; además, tendrán que acomodarse a la necesidad de conservar la energía y los recursos y proteger la calidad del medioambiente, la salud pública y promover el desarrollo socioeconómico equitativo.

Estos sistemas deberán contribuir al desarrollo rural y a la igualdad social. Para que esto suceda, los mecanismos políticos deberán incentivar la sustitución de capital por mano de obra, reducir los niveles de mecanización y el tamaño predial, diversificar la producción agrícola y hacer hincapié en la participación de los agricultores y trabajadores en el proceso de desarrollo. Reformas sociales en esta dirección proveerán los beneficios adicionales de aumentar el empleo y reducir la dependencia de los agricultores en el gobierno, el crédito y la industria. Es evidente entonces que los requisitos de una agricultura sustentable engloban aspectos técnicos, ambientales, institucionales y de políticas agrarias (Figura 7).

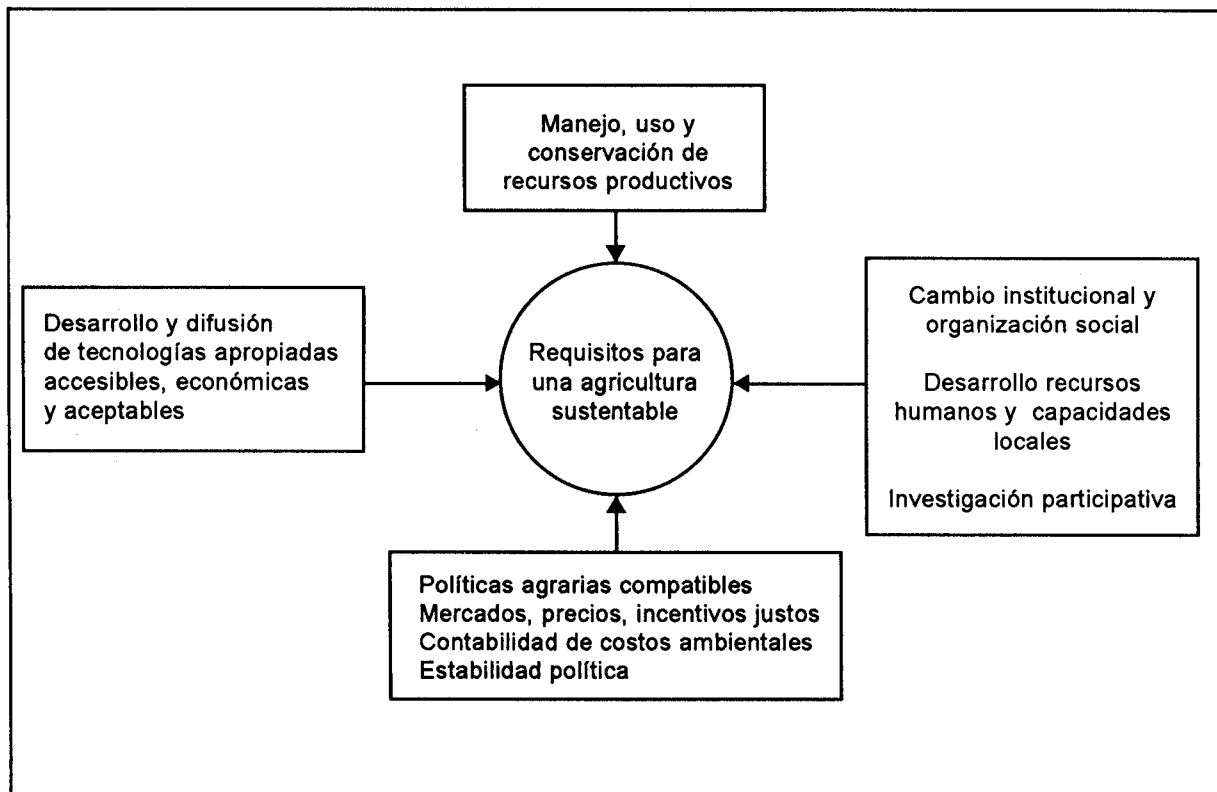


FIGURA 7. Requisitos globales para el desarrollo de una agricultura sustentable.

FIGURE 7. Requirements of a sustainable agriculture.

LITERATURA CITADA

- ALTIERI, M.A. 1987. *Agroecology, the scientific basis of alternative agriculture*. Westview Pass, Boulder. 227 p.
- ALTIERI, M.A. 1992. *Biodiversidad agroecología y manejo de plagas*. CETAL Ediciones, Valparaíso. 162 p.
- ALTIERI, M.A. y LETOURNEAU, D.K. 1992. Vegetation arrangement and biological control in agroecosystems. *Crop Protection*: 405-430.
- ANDOW, D.A. 1991. Vegetational diversity and arthropod population response. *Annual Review of Entomology* 35: 561-586.
- CONWAY, G.R. and BARBIER, E.B. 1990. *After the green revolution: sustainable agriculture for development*. Earthscan Publications, London. 168 p.
- COX, G. and ATKINS, M.D. 1979. *Agricultural Ecology*. W.H Freeman and Sons (Edit.). San Francisco. 452 p.
- EDWARDS, C.A.; LAL, R.; MADDEN, P.; MILLER, R.H. and HOUSE, G. (ed.). 1990. *Sustainable agriculture systems*. Soil and water conservation society, Ankeny, Iowa. 307 p.
- EDWARDS, C.A.; FRANCIS C.A. and HARWOOD, R.R. 1993. The role of agroecology and integrated farming systems in agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 46: 99-121.
- FAETH, P.; REPETTO R.; KROLL, K.; DAI, Q. and HERMERS, G. 1991. *Paying the farm bill: US agricultural policy and the transition to sustainable agriculture*. World Resources Institute. Washington D.C. 172 p.
- LAL, R. 1994. *Methods and guidelines for assessing sustainable of soil and water resources in the tropics* SMSS Technical Monograph 21. USDA Soil Conservation Service. Washington D.C. 73 p.
- LITSINGER, J.A. and MOODY, K. 1976. *Integrated pest management in multiple cropping systems*. P.A. Sanchez (ed.). ASA Publication Nº 27 Madison, WI. p.: 293-316.
- MEYER, J.R.; CAMPBELL, C.L.; MOSEV, J.J. and HECK, W.W. 1992. *Indicators of the ecological status of agroecosystems*. In: Makenzie, D.H. *Ecological indicators*. Elsevier Applied Science. London. Vol. I. p.: 92-109
- NRC- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1989. *Alternative Agriculture*. National Academy Press. Washington D.C.
- PIMENTEL, D.; ANDOW, D.; DYSON-HUDSON, R.; GALLAHAN, D. and VINZANT, B. 1980. *Environmental and Social Costs of pesticides: a preliminary assessment*. *Oikos* 34: 127-140.
- POWELL, W. 1990. *Enhancing parasitoid activity in crops*. In: J. Waage y D. Greathead (ed.). *Insect parasitoids*. Academic Press. London. p.: 319-335.
- REIJNTJES, C., HAVERKORT, B. and WATERS-BAYER, A. 1992. *Farming for the future. An introduction to low-external input and sustainable agriculture*. MacMillan, London. 334 p.
- SOUTHWOOD, T.R.E. and WAY, M.J. 1970. *Ecological background to pest management*. In: *Concepts of pest management*. R.L. Rabb y F.E. Guthrie (ed.). North Carolina State Univ. Press. Raleigh. p.: 25-43.