

AGROECOLOGÍA Y EL DISEÑO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS RESILIENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO

Clara I. Nicholls¹, Alejandro Henao², Miguel A. Altieri³,

¹International and Area Studies, University of California, Berkeley, 137 Mulford Hall-3114, Berkeley, CA 94720-3114;

²Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural de Antioquia, Calle 42B Número 52- 106 – Centro Administrativo Departamental, Medellín, Colombia. ³College of Natural Resources, University of California -Berkeley, California 94720, USA. E-mail: nicholls@berkeley.edu

Resumen

Se anticipa que el cambio climático cause impactos sobre la producción agrícola que serán diversos, severos y específicos según la ubicación geográfica. La temperatura y la disponibilidad de agua siguen siendo factores clave que determinan el crecimiento de los cultivos y la productividad. Los cambios predichos en estos factores causarán una baja en el rendimiento de los cultivos. Los cambios inducidos por el clima en cuanto a las dinámicas de población de plagas de insectos, patógenos y malezas y su invasividad podrían agravar los efectos mencionados. Sin duda alguna, la inestabilidad inducida por el clima y el tiempo afectará los niveles de producción de alimentos y el abastecimiento de los mismos. Los cambios para la adaptación que no modifiquen radicalmente la naturaleza dominante del monocultivo podrían moderar temporalmente los impactos negativos. Los beneficios mayores y más duraderos provendrán de medidas agroecológicas más radicales que fortalezcan la resiliencia de los agricultores y las comunidades rurales, tales como la diversificación de los agroecosistemas en forma de policultivos, los sistemas agroforestales y los sistemas que combinen la agricultura con la ganadería, acompañados por el manejo orgánico de los suelos, la conservación y la cosecha de agua y un incremento general de la agrobiodiversidad. Los sistemas agrícolas tradicionales son depósitos de abundantes principios y medidas que pueden ayudar a que los sistemas agrícolas modernos se vuelven más resilientes a los extremos climáticos. Muchas de las estrategias agroecológicas tradicionales que reducen la vulnerabilidad a la variabilidad climática incluyen la diversificación de cultivos, el mantenimiento de la diversidad genética local, la integración de los animales, la adición de materia orgánica al suelo, la cosecha de agua, etc. Urge entender las características agroecológicas que son la base de la resiliencia de los agroecosistemas tradicionales, ya que de ahí se pueden derivar principios útiles que sirvan de base para el diseño de sistemas agrícolas adaptados. Los estudios sobre el terreno y los resultados reportados en la literatura sugieren que los agroecosistemas son más resilientes cuando están insertados en una matriz de paisaje compleja, que incluya germoplasma local adaptado utilizado en sistemas de cultivos diversificados manejados con suelos ricos en materia orgánica y técnicas de conservación-cosecha de agua.

Los principios y prácticas de resiliencia en los que se basan las fincas exitosas pueden ser difundidos a miles de agricultores a través de redes campesino a campesino para ampliar las prácticas agroecológicas que incrementan la resiliencia de los agroecosistemas.

Palabras clave: Agroecología, cambio climático, resiliencia, capacidad de adaptación.

Summary

Agroecology and the design of climate change resilient farming systems

Diverse, severe and location-specific impacts on agricultural production are anticipated with climate change. Temperature and water availability remain key factors in determining crop growth and productivity, predicted changes in these factors will lead to reduced crop yields. Climate induced changes in insect pest, pathogen and weed population dynamics and invasiveness could compound such effects. Undoubtedly climate and weather induced instability will affect levels of and access to food supply. Changes that will not radically modify the monoculture nature of dominant agroecosystems may temporarily moderate negative impacts. The biggest and most durable benefits will likely result from more radical agroecological measures that will strengthen

the resilience of farmers and rural communities, such as diversification of agroecosystems in the form of polycultures, agroforestry systems and crop-livestock mixed systems accompanied by organic soil management, water conservation and harvesting and general enhancement of agrobiodiversity. Traditional farming systems are repositories of a wealth of principles and measures that can help modern agricultural systems become more resilient to climatic extremes. Many of these agroecological strategies that reduce vulnerabilities to climate variability include, crop diversification, maintaining local genetic diversity, animal integration, soil organic management, water conservation and harvesting, etc. Understanding the agroecological features that underlie the resilience of traditional agroecosystems is an urgent matter, as they can serve as the foundation for the design of adapted agricultural systems. Field surveys and results reported in the literature suggest that agroecosystems are more resilient when inserted in a complex landscape matrix, featuring adapted local germplasm deployed in diversified cropping systems managed with organic matter rich soils and water conservation-harvesting techniques. The identification of systems that have withstood climatic events recently or in the past and understanding the agroecological features of such systems that allowed them to resist and/or recover from extreme events is of increased urgency, as the derived resiliency principles and practices that underlie successful farms can be disseminated to thousands of farmers.

Key words: Agroecology, climate change, resilience, adaptive capacity.

1. INTRODUCCIÓN

El reciente informe del IPCC (2014) reafirma con autoridad que el cambio y la variabilidad del clima impactarán sobre la producción de alimentos y fibra a nivel global debido a los efectos sobre el crecimiento y rendimiento de los niveles elevados de CO₂, las temperaturas más altas, la alteración de las precipitaciones y de los regímenes de transpiración y el aumento en la frecuencia de eventos extremos, así como el cambio en la presión ejercida por malezas, plagas y patógenos. Aunque los estudios de modelización sugieren que habrá una mayor pérdida de cultivos debido a la variabilidad climática y el aumento en la frecuencia de eventos extremos tales como sequías e inundaciones o cambios en las precipitaciones y en la variación de la temperatura, los impactos sobre los sistemas alimentarios a escala global podrían ser relativamente leves en especial durante la primera mitad del siglo XXI (Adams *et al* 1998). Estos efectos, sin embargo, serán progresivamente más negativos después de ese periodo. La creencia tradicional sostiene que la producción de cultivos en los países en desarrollo (principalmente en latitudes bajas) podría sufrir más, y más pronto, que en los países desarrollados (principalmente en latitudes medias a altas) debido a una combinación de condiciones agro-climáticas, socio-económicas y tecnológicas adversas (Rosenzweig y Hillel 2008).

Debido a estos impactos, se estima que el cambio climático por sí solo hará aumentar el número de personas desnutridas a entre 40 millones y 170 millones. Además, los efectos del aumento progresivo de las temperaturas globales promedio conducirán sucesivamente a un pronunciado aumento en los precios de los alimentos (hasta un 30%), que a su vez causará trastornos sociales

más frecuentes como los vistos durante los disturbios por escasez de alimentos en 2008 (Hillel y Rosenzweig 2009). No hay duda de que la inestabilidad de la disponibilidad de alimentos y fibras inducida por el clima y las condiciones meteorológicas alterarán la estabilidad social y económica y la competitividad regional (Ziska y Dukes 2014).

Estos hallazgos sugieren dos realidades importantes: a) debido a que la agricultura depende en gran medida de que haya agua y temperaturas adecuadas y un delicado equilibrio de gases como el dióxido de carbono y el metano en la atmósfera, la producción agrícola es la actividad humana más vulnerable a los efectos del cambio climático; y b) el cambio climático y la seguridad alimentaria global están inextricablemente ligadas. Lo trágico es que el 80% de las tierras agrícolas están siendo utilizadas cada vez más para cultivar un puñado de productos básicos (maíz, soya, trigo, arroz y otros), reduciendo peligrosamente la diversidad genética presente en los sistemas agrícolas globales (Adams *et al* 1971). La mayoría de estos cultivos son producidos en "sistemas modernos de monocultivo" que debido a su homogeneidad ecológica son particularmente vulnerables al cambio climático además de a los estreses bióticos (como plagas y enfermedades). Este estado ecológico en que se encuentra la agricultura industrial constituye una amenaza importante para la seguridad alimentaria de la humanidad (Heinemann *et al* 2013).

Es evidente que los sistemas actuales de producción basados en el monocultivo tendrán que adaptarse para enfrentar estas presiones cambiantes asociadas a la frecuencia e intensidad de las condiciones meteorológicas extremas. La adaptación es considerada un factor clave que determinará la severidad futura de los impactos del cambio climático sobre la producción de alimen-

tos. Pero esto dependerá de los tipos de estrategias de adaptación que se utilicen. Los cambios que no modifiquen radicalmente la estructura del monocultivo de los agroecosistemas dominantes, tales como el cambio de las fechas de siembra, la transición hacia nuevas variedades de cultivos, la expansión y mejora del riego, pueden moderar los impactos negativos, pero solo temporalmente (Matthews *et al* 2013). Los beneficios mayores y más duraderos serán el resultado de medidas agroecológicas más radicales que incluyan la diversificación de los agroecosistemas en forma de policultivos, sistemas agroforestales y sistemas que combinen la agricultura con la ganadería, acompañados por el manejo orgánico de los suelos, la conservación y la cosecha del agua y un incremento general de la agrobiodiversidad. En este documento sostenemos que lo que se necesita es una transformación agroecológica de los monocultivos que se logrará favoreciendo la diversidad vegetal en los campos así como la heterogeneidad del paisaje, una estrategia que representa una ruta sólida para aumentar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de la producción agrícola a la vez que reduce los impactos socio-económicos y ambientales no deseados debidos al cambio climático (Altieri 2002, de Schutter 2010).

2. LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Hay una gran cantidad de literatura que analiza los impactos que el calentamiento global tendrá sobre el crecimiento y la producción de los cultivos (Kurukulasuriya y Rosenthal 2003, Easterling *et al* 2007, Lobell y Gourdji 2012). Aunque los autores ofrecen diferentes escenarios, el consenso es que la productividad de los cultivos y del ganado podría disminuir debido a las altas temperaturas y al estrés causado por las sequías, pero que estos efectos variarán según las regiones. Se anticipa que el cambio climático cause impactos sobre la producción agrícola que serán diversos y específicos según la ubicación. Mientras que es probable que la oferta agrícola a nivel mundial sea robusta luego de enfrentarse a cambios climáticos moderados, se espera que la variación regional sea severa. Las regiones en latitudes medias o altas (donde el calentamiento global extenderá la temporada de cultivo) podrían no experimentar la disminución en el rendimiento esperado en las regiones tropicales, que probablemente serán las más afectadas por el cambio climático, al punto de sufrir pérdidas significativas en la producción agrícola. Muchos de estos países también sufren actualmente presiones económicas y ecológicas severas. Se espera que el cambio climático cause que los sectores agrícolas de estos países sufran más dificultades. Los estudios históricos demuestran que el cambio climático ya ha tenido un impacto negativo en el rendimiento de los cultivos. El rendimiento del maíz, el trigo y otros granos

importantes ya ha sufrido reducciones considerables relacionadas con el clima equivalentes a 40 millones de toneladas por año desde 1981 hasta 2002 a nivel global (Lobell *et al.* 2011). Jones y Thornton (2003) proyectaron una reducción de alrededor del 10% en la producción de maíz en África y América Latina en diversos escenarios climáticos para 2055, lo que equivaldría a pérdidas de US\$ 2 billones por año.

Los cambios en el total de las precipitaciones estacionales o en su patrón de variabilidad también afectarán la producción de cultivos, pero la mayoría de los modelos afirman que la mayor parte de los impactos serán impulsados por las tendencias de la temperatura antes que de la precipitación. Los cambios en el rendimiento de los cultivos de secano serán impulsados por cambios tanto en la precipitación y en la temperatura, mientras que los cambios en el rendimiento en las tierras de riego serán principalmente impulsados por los cambios en la temperatura. Las temperaturas más cálidas podrían causar que muchos cultivos crezcan más rápidamente, pero también podrían reducir el rendimiento de determinados cultivos. El efecto que tenga el aumento de la temperatura dependerá de la temperatura óptima para el crecimiento y la reproducción de cada cultivo en particular; en zonas donde el calentamiento supere la temperatura óptima de un cultivo, el rendimiento podría disminuir (Lobell y Field 2007).

Se proyecta que la demanda de agua para riego se incremente donde el clima sea más cálido, lo que aumentará la evaporación del suelo y acelerará la transpiración de las plantas, produciendo una mayor competencia entre la agricultura y los usuarios urbanos e industriales. Es probable que el aumento de la evapotranspiración potencial intensifique el estrés producido por sequías, especialmente en los trópicos y subtropicos semiáridos, por lo que estas regiones de secano (89% de los cereales del África subsahariana son de secano) podrían requerir riego, produciendo costos mayores y conflictos en torno al acceso al agua (Doll 2002). El descenso de los niveles de la capa freática y el consiguiente aumento de la energía necesaria para bombear el agua haría que el riego sea más caro, particularmente cuando en condiciones más secas se necesite más agua por hectárea.

El clima es un importante motor de la dinámica de las poblaciones de plagas; la temperatura, especialmente, tiene una influencia fuerte y directa sobre el desarrollo la reproducción y la supervivencia de los insectos. No cabe duda de que el cambio climático requerirá estrategias de manejo adaptables para lidiar con el estado alterado de plagas y patógenos. Algunos investigadores creen que ciertos insectos plaga, enfermedades y malezas podrían sobrevivir o incluso reproducirse con mayor frecuencia cada año si los inviernos fríos ya no los mantienen a raya. Las temporadas de cultivo más largas permitirían que ciertas plagas de insectos completen más ciclos de reproducción durante la primavera, el verano y

el otoño (Porter *et al.* 1991). Las temperaturas invernales más cálidas también podrían permitir que ciertas larvas pasen el invierno en zonas donde en la actualidad están limitadas por el frío, causando una mayor infestación durante la siguiente temporada de cultivo. Nuevas plagas también podrían invadir nuevas regiones conforme vayan cambiando la temperatura y la humedad. Por ejemplo, las plagas de latitudes bajas podrían trasladarse a latitudes más altas. Además la alteración de los patrones de viento podría cambiar la expansión tanto de las plagas de insectos propagadas por el viento como de las bacterias y hongos que son agentes de muchas enfermedades de los cultivos (Coakley *et al.* 1999). Se espera que las variaciones climáticas previstas medien el rango de expansión de las especies invasoras, las que constituyen plagas para la agricultura, la silvicultura, los productos almacenados, los hogares y otras estructuras y pueden ser parásitos o vectores de enfermedades. Esto es particularmente preocupante en el caso de los insectos, que además de causar grandes pérdidas de cultivos, tienen el potencial de afectar la biodiversidad nativa. En América del Norte los insectos invasores ya representan el 40% de las principales especies de plagas de insectos, a pesar de que representan sólo el 2% de la fauna total de insectos (Ward y Masters 2007).

Se requiere de una jerarquía de herramientas analíticas para realizar evaluaciones de riesgo, producir políticas y diseñar sistemas de manejo de plagas a escalas que vayan desde regiones hasta paisajes y parcelas. Estas herramientas incluyen modelos para predecir distribuciones geográficas potenciales, fenología estacional y dinámicas poblacionales en una gama de escalas espaciales y temporales (Sutherst *et al.* 2011). Por ejemplo Ponti *et al.* (2014) estimaron los efectos del cambio climático sobre la dinámica y la interacción de los olivos y la mosca del olivo usando modelos demográficos basados en la fisiología en un contexto de sistema de información geográfica basado en un escenario climático en el que las condiciones cambian diariamente. En su evaluación del impacto del cambio climático sobre los agroecosistemas del olivar analizaron las interacciones tróficas, que incluyen los efectos del cambio climático sobre la fenología del olivo, el crecimiento y el rendimiento, y sobre la dinámica y el impacto de su mayor plaga obligada, la mosca del olivo y sus enemigos naturales asociados. Los límites térmicos del olivo y la mosca son diferentes y afectan las interacciones tróficas que son cruciales para estimar el impacto bioeconómico del cambio climático sobre el olivo en toda la cuenca mediterránea.

Se espera que las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el hombre aumenten las concentraciones de dióxido de carbono hasta en un 57 % para el año 2050. Muchas publicaciones agronómicas afirman que el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera podría ser positivo para la

agricultura porque hace aumentar el ritmo de la fotosíntesis y el uso eficiente del agua (Fuhrer 2003). Estos efectos son más fuertes en plantas con metabolismo fotosintético C3, que incluyen cultivos como el trigo, el arroz y la soya, cuyos rendimientos podrían aumentar en un 30% o más si se duplicaran las concentraciones de CO₂. El enriquecimiento de dióxido de carbono también es positivo para plantas C4 tales como el maíz, el mijo y el sorgo, pero que exhiben una respuesta mucho menor (aumento de rendimiento menor del 10%) (Hatfield *et al.* 2011). Al mismo tiempo, existe un debate sobre si los incrementos previstos en la productividad causados por el CO₂ (efecto de fertilización por CO₂) han sido sobrestimados, en vista de que es probable de que los aumentos proyectados de CO₂ atmosférico a nivel global cambien la biología de las malezas agrícolas, las que a su vez podrían limitar considerablemente el rendimiento de los cultivos (Ziska y Dukes 2014).

Las evaluaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) indican que el incremento de CO₂ y de gases de efecto invernadero asociados podría causar un aumento de 1.4 a 5.8°C en las temperaturas superficiales globales, con las consecuencias subsiguientes sobre la frecuencia y cantidad de las precipitaciones. La temperatura y la disponibilidad de agua siguen siendo factores clave que determinan el crecimiento de los cultivos y la productividad, de manera que cambios en estos factores podrían causar un menor rendimiento de los cultivos. Los cambios inducidos por el clima en cuanto a las dinámicas de población de plagas de insectos, patógenos y malezas y su invasividad podrían agravar los efectos mencionados. El aumento de la frecuencia de la pérdida de cultivos debido a estos eventos extremos podría superar los efectos positivos del aumento moderado de la temperatura y el CO₂. El aumento en la frecuencia y los patrones de los fenómenos meteorológicos extremos afectarán la estabilidad en el suministro de alimentos y el acceso a ellos.

3. LA VULNERABILIDAD DE LOS AGROECOSISTEMAS

En la actualidad los monocultivos han aumentado dramáticamente en todo el mundo, principalmente a través de la expansión geográfica de tierras dedicadas a un solo cultivo y la producción de la misma especie en las mismas tierras año tras año. No menos del 80% de los 1.5 billones de hectáreas de tierras cultivables está dedicada al monocultivo de unos cuantos cereales y animales. Sólo el trigo, el maíz, el arroz y las papas representan aproximadamente el 60 por ciento de los alimentos de origen vegetal en el mundo, y sólo 14 especies de animales proporcionan el 90 por ciento de todas las proteínas animales (Vigouroux 2011). Genéticamente, la agricultura moderna depende asombrosamente de un puñado de variedades para sus principales cultivos. A fines del siglo XX en los EEUU, el 60-70%

de la superficie total de tierras dedicadas al cultivo de frijoles contenía apenas 2-3 variedades de frijol, el 72% de las tierras dedicadas a cultivar papas contenía cuatro variedades y el 53% de las tierras dedicadas al cultivo de algodón desplegaban solo tres variedades (Robinson y Wallace 1996). Los datos disponibles indican que en la actualidad la diversidad de los cultivos por unidad de tierra cultivable sigue menguando, lo que en parte se explica por el uso de más de aproximadamente 180 millones de hectáreas de cultivos transgénicos (principalmente soya y maíz) que fueron cultivados en todo el mundo en 2013 y la creciente tendencia a producir grandes monocultivos de maíz, caña de azúcar, palma africana y soya para la elaboración de biocombustibles.

En la última década, más de 100 millones de hectáreas de tierra alrededor del mundo han sido vendidas a inversores extranjeros a través de transacciones de tierras (fenómeno conocido como acaparamiento de tierras) y más del 60 % de los cultivos producidos en esas tierras en los países en desarrollo son monocultivos destinados a la exportación. Dos tercios de estas transacciones de tierras agrícolas se dan en países con graves problemas de hambre (Franco *et al.* 2014).

Muchos científicos han sostenido que la reducción drástica de la diversidad de plantas cultivadas ha puesto a la producción de alimentos del mundo en mayor peligro y han hecho reiteradas advertencias sobre la vulnerabilidad extrema asociada con la uniformidad genética de los cultivos, afirmando que la homogeneidad ecológica en la agricultura está estrechamente ligada a las invasiones y brotes de plagas (Adams *et al.* 1971, Altieri y Nicholls 2004). Estas preocupaciones no son nuevas y quedaron de manifiesto en 1972 con el informe "Genetic Vulnerability of Major Crops" (National Research Council 1972), en el que se declaró:

"A lo largo del tiempo la tendencia en el mejoramiento de los cultivos ha sido seleccionar variedades con características que producen un mayor rendimiento, en gran parte concentrándose en las cepas genéticas que combinan las características más deseables. La homogeneidad y uniformidad que resultan de ello pueden ofrecer ventajas sustanciales tanto en la cantidad como en la calidad de la cosecha, pero esta misma homogeneidad genética puede también reflejar una mayor susceptibilidad a patógenos. De manera que parece que cuanto más altera el equilibrio natural la selección agrícola a favor de la uniformidad de las variedades en grandes áreas, más vulnerables son esas variedades a las pérdidas causadas por epidemias. Paradójicamente, la erosión de la diversidad causada por el mejoramiento selectivo ha demostrado ser un efecto secundario indeseable del progreso científico".

Este informe fue preparado por científicos quienes, alertados sobre la epidemia de tizón de la hoja de maíz por *Helminthosporium maydis* en 1970 en los Estados Unidos, se preocuparon por la posibilidad de que otros

cultivos importantes pudieran ser afectados por epidemias semejantes. La epidemia de tizón de la hoja de maíz de los Estados Unidos resultó en una reducción estimada de 15% en la producción de maíz (Rubenstein *et al.* 2005), o el equivalente a una pérdida de un billón de dólares. El rendimiento en 1970 fue de 45,439 hg/ha, considerablemente menor que en 1969 (53,908 hg/ha) y en 1971 (55,297 hg/ha). Con 23,211,600 de hectáreas sembradas en 1970, la producción proyectada era de 126,289,673 toneladas de las que se perdieron 20,818,673 toneladas. Si estimamos que las calorías (kcal) en 1 tonelada de maíz son 888,889, la pérdida fue equivalente a 18.5 trillones (18.5×10^{12}) de calorías (Heinemann *et al.* 2013).

Pero hay muchos otros casos históricos que prueban que la reducción drástica de la diversidad de plantas cultivadas amenaza la producción de alimentos del mundo (Altieri 1999a). La hambruna irlandesa por la destrucción del cultivo de la papa fue el resultado de la diseminación de un clon genéticamente uniforme (de una sola variedad llamada Lumpers) y el brote de una epidemia de un hongo, el tizón tardío de la papa (*Phytophthora infestans*), que causó una reducción del 80% en el rendimiento. Como resultado, millones de irlandeses murieron de hambre y otros dos millones emigraron. La gran hambruna de Bengala en la India en 1943 fue el resultado de una enfermedad devastadora (*Cochliobolus miyabeanus*) que casi acabó con la producción de arroz. Hace más de un siglo en Francia ocurrió un excelente ejemplo de devastación a esa misma escala por plagas de insectos cuando las cepas de vides fueron totalmente eliminadas por ataques de *Phylloxera vertifoliae*, hasta que un cultivar resistente fue introducido desde los EEUU (Thrupp 1998). Las pérdidas sustanciales de rendimiento como resultado de plagas, alrededor de 20 a 30 % para la mayoría de los cultivos antes de la cosecha, a pesar del aumento en el uso de pesticidas (alrededor de 4.7 billones de libras de pesticidas fueron utilizados en todo el mundo en 1995, 1.2 billones de libras sólo en los Estados Unidos), es una clara indicación de que las plantas cultivadas que crecen como monocultivos genéticamente homogéneos no poseen los mecanismos de defensa ecológica necesarios para prevenir o tolerar el impacto de los brotes de plagas (Pimentel y Levitan 1986).

Se podría pensar que los ejemplos anteriores deberían haber advertido a la comunidad científica agrícola sobre los riesgos asociados a la homogeneización de los agroecosistemas modernos dando lugar a cambios importantes para incrementar la diversidad genética y ecológica de los principales cultivos, reduciendo así el riesgo de futuros brotes. Tres décadas más tarde, el tema de la vulnerabilidad agrícola todavía sigue en discusión y el debate continúa sobre el riesgo que representa actualmente cuando nos enfrentamos al cambio climático. Muchos investigadores están empezando a darse cuenta de que

los sistemas agrícolas modernos parecen ser muy vulnerables a la variabilidad del clima, ya sea ésta inducida naturalmente o como resultado de actividades humanas.

La peor sequía de los últimos 50 años afectó severamente la producción de cultivos de los EEUU en 2012. Se estima que la sequía afectó a 26 de los 52 estados y que cubrió por lo menos 55% de la superficie terrestre de los EEUU, es decir casi 1 billón de hectáreas. A fines de julio de 2012, en comparación con un año promedio, el 38% de la cosecha de maíz de EEUU ya había sido clasificada como de mala calidad, al igual que el 30% de la cosecha de soya, a causa de la sequía y el calor extremo. Puesto que la cosecha de maíz es la más importante de los EEUU y fue tasada en US\$ 76.5 billones en 2011, con una reducción del rendimiento del 30% las pérdidas económicas en 2012 fueron sustanciales (Heinemann *et al.* 2013). Como las exportaciones de maíz y soya de los EE.UU. representan el 53% y el 43% de las exportaciones globales respectivamente, el impacto de la sequía de 2012 sobre los precios internacionales fue significativo. En 2013 hubo aumentos en los precios de los alimentos de 3 a 4%, y de 4 a 5% en el precio de la carne. En 2010, una sequía severa en Rusia resultó en la pérdida de una cuarta parte de la cosecha de trigo en más de 1 millón de hectáreas, a un costo estimado de US\$ 1.4 billones. Las intensas lluvias monzónicas en 2011 causaron en Pakistán las peores inundaciones jamás registradas, destruyendo 2.4 millones de hectáreas de tierras cultivadas y matando a 450,000 cabezas de ganado a un costo de 2.9 billones de dólares (IPPC 2014).

Los cambios a gran escala en la diversidad del paisaje debido a las grandes plantaciones de agrocombustibles podrían resultar en más brotes de insectos debido a la expansión de los monocultivos a expensas de la vegetación natural, afectando directamente la abundancia y diversidad de los enemigos naturales de insectos plaga. En cuatro estados del medio oeste de los EE.UU. la reciente expansión del cultivo de biocombustibles como monocultivo ha resultado en una menor diversidad del paisaje, disminuyendo el suministro de enemigos naturales en las parcelas de soya y reduciendo los servicios de control biológico en un 24%. Esta pérdida de los servicios de control biológico ha costado a los productores de soya en esos estados un estimado de US\$ 58 millones por año a causa del menor rendimiento y el aumento en el uso de pesticidas (Landis *et al.* 2008).

Enfrentar el cambio climático requerirá fortalecer la resiliencia de los agricultores y las comunidades rurales y ayudarlos a adaptarse a los efectos del cambio climático. La clave para el desarrollo de estrategias de adaptación que sean adecuadas y específicas es primero entender el impacto del cambio climático en diferentes regiones agroclimáticas y luego analizar el nivel de vulnerabilidad de los agroecosistemas evaluados, de manera de sugerir nuevos diseños y manejos que incrementen la resiliencia.

4. SISTEMAS AGRÍCOLAS TRADICIONALES COMO MODELOS DE RESILIENCIA

Al contrario que los monocultivos de la agricultura industrial, muchos sistemas agrícolas tradicionales, que aún persisten en varios países en desarrollo, ofrecen una amplia gama de opciones y diseños de manejo que incrementan la biodiversidad funcional en los campos de cultivo, y por consiguiente, refuerzan la resiliencia de los agroecosistemas (Koohafkan y Altieri 2010, Toledo y Barrera-Bassols 2008). Al tener que lidiar continuamente con fenómenos meteorológicos extremos y la variabilidad climática a través de los siglos, muchos agricultores que viven en entornos hostiles en África, Asia y América Latina han desarrollado y/o heredado sistemas agrícolas complejos manejados de maneras ingeniosas. Estos sistemas han permitido a los pequeños agricultores familiares satisfacer sus necesidades de subsistencia en medio de la variabilidad ambiental sin depender de tecnologías agrícolas modernas (Denevan 1995). La supervivencia de millones de hectáreas cultivadas de manera tradicional es la prueba viviente de una estrategia agrícola indígena exitosa y constituye un homenaje a la "creatividad" de los pequeños agricultores del mundo en desarrollo (Wilken 1987).

Una manifestación de esta creatividad son los miles de hectáreas de sistemas de cultivo en camellones elevados en tierras inundadas estacionalmente en las sabanas y en las cuencas altas de Surinam, Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. El origen y el uso de estos sistemas han sido asociados tradicionalmente con temas relacionados al manejo del agua, ya sea proporcionando oportunidades para reducir los impactos adversos del exceso de agua en la producción de los cultivos, para cosechar el exceso de agua o para regar los cultivos en épocas de escasez de lluvias. Ejemplos de agricultura en humedales expuestos a inundaciones temporales son las chinampas utilizadas en el Valle de México (Armillas 1971), y los waru warus utilizados cerca del lago Titicaca en Perú y Bolivia (Erickson y Chandler 1989).

En la actualidad, bien entrada la segunda década del siglo XXI, millones de pequeños agricultores, agricultores familiares e indígenas siguen practicando un tipo de agricultura que conserva y regenera los recursos naturales. Ésta es una prueba de la notable resiliencia de los agroecosistemas a los continuos cambios ambientales y económicos, a la vez que contribuyen sustancialmente a la conservación de la agrobiodiversidad y la seguridad alimentaria a nivel local, regional y nacional (Netting 1993). Una revisión de 172 estudios de casos e informes de proyectos de todo el mundo ha demostrado que la biodiversidad agrícola tal como es utilizada por los agricultores tradicionales contribuye a la resiliencia a través de varias estrategias que a menudo se usan combinadas: la protección y restauración de los ecosistemas, el

uso sostenible del suelo y el agua, la agrosilvicultura, la diversificación de los sistemas agrícolas, diversos ajustes en las prácticas de cultivo y el uso de cultivos tolerantes al estrés (Mijatovic *et al.* 2013).

A pesar de la resiliencia de la agricultura tradicional, el cambio climático plantea graves retos a cerca de 370 millones de los agricultores más pobres, que viven en áreas a menudo situadas en zonas áridas o semiáridas y en montañas y cerros ecológicamente vulnerables (Thornton 2003). En muchos países cada vez más personas, especialmente aquellas de ingresos más bajos, están obligadas a vivir en zonas marginales (es decir, en llanuras sujetas a inundaciones, laderas expuestas, tierras áridas o semiáridas), donde están más expuestas a los impactos negativos de la variabilidad climática. Pequeños cambios en el clima pueden tener efectos desastrosos sobre las vidas y los medios de sustento de estos grupos vulnerables. Las consecuencias de estos cambios para la seguridad alimentaria podrían ser muy severas, especialmente para los agricultores de subsistencia que viven en entornos remotos y frágiles donde el rendimiento suele ser muy bajo. Estos agricultores dependen de cultivos que podrían ser afectados de manera dramática, tales como el maíz, los frijoles, las papas y el arroz. La pérdida del 10-30% de la producción puede ser desastrosa para la sobrevivencia de miles de familias rurales.

A pesar de las serias consecuencias que predicen los modelos, estos datos representan una aproximación a veces burda, a los efectos del cambio climático sobre la agricultura a pequeña escala. En muchos casos los estudios han ignorado la capacidad de adaptación de aquellos campesinos que utilizan diversas estrategias

agroecológicas y redes sociales de solidaridad que les permite lidiar e incluso prepararse para la variabilidad climática extrema (Altieri y Koohafkan 2008). Muchos investigadores han encontrado que a pesar de su alta exposición/susceptibilidad, los pueblos indígenas y las comunidades locales están respondiendo activamente a las condiciones climáticas cambiantes y han demostrado su ingenio y resiliencia ante el cambio climático (Tabla 1). Estrategias tales como el mantenimiento de la diversidad genética y de especies de cultivos y animales proporcionan un mecanismo de amortiguación de bajo riesgo en entornos donde el clima es incierto (Altieri y Nicholls 2013). Al crear diversidad tanto temporal como espacialmente, los agricultores tradicionales añaden aún más diversidad funcional y resiliencia a sistemas sensibles a las fluctuaciones temporales del clima (Perfecto *et al.* 2009).

Un estudio multinacional, que exploró la resiliencia de varios sistemas agrícolas de pequeños agricultores africanos a la variabilidad y el cambio del clima entre 2007 y 2010, reveló las prioridades de los agricultores en cuanto a estrategias de adaptación al cambio climático: (a) mejorar la fertilidad del suelo con abonos verdes y residuos orgánicos, (b) conservar el agua y el suelo, (c) desarrollar mecanismos para la creación y el mantenimiento de reservas locales estratégicas de alimentos, (d) apoyar las redes sociales tradicionales de seguridad para proteger a los grupos sociales vulnerables, (e) conservar los árboles frutales nativos y otras variedades de cultivos adaptados localmente, (f) utilizar prácticas que alternan el barbecho y la labranza para lidiar con las deficiencias de humedad y nutrientes relacionadas con el cambio climático y (g) cambiar la topografía de

Tabla 1. Conocimiento Indígena, Vulnerabilidad y Capacidad de Resiliencia.

Conocimiento Indígena, Vulnerabilidad y Capacidad de Resiliencia (Nakashima <i>et al.</i> 2012)
1. Los pueblos indígenas y las poblaciones marginadas están particularmente expuestos y son sensibles al impacto del cambio climático debido a que dependen de medios de subsistencia obtenidos de recursos locales y a que sus tierras se localizan en entornos marginales.
2. Poblaciones reducidas, aisladas y la ausencia de derechos reconocidos sobre sus territorios y sus recursos pueden también contribuir a la vulnerabilidad de grupos indígenas a los impactos económicos y ambientales que produce el cambio climático.
3. A pesar de su alta exposición-sensibilidad, las comunidades indígenas y las comunidades locales, están respondiendo activamente a las condiciones climáticas cambiantes y en muchos casos han demostrado su capacidad de reacción y recuperación frente al cambio climático.
4. El conocimiento indígena y las prácticas de subsistencia basadas en el conocimiento local son los cimientos de la capacidad de resiliencia indígena.
5. Estrategias tales como el mantenimiento de la diversidad genética y de la diversidad de especies en sus campos y en sus rebaños desempeñan un papel amortiguante ante condiciones meteorológicas inciertas.
6. El uso diversificado del paisaje, la movilidad y el acceso a múltiples recursos aumentan la capacidad de responder ante la variabilidad y el cambio medioambiental, incluyendo al cambio climático.
7. Los sistemas tradicionales de gobierno y sus redes sociales contribuyen a la capacidad de responder colectivamente ante el cambio medioambiental y por lo tanto aumentan la capacidad de resiliencia.
8. La equidad de género en las políticas y las respuestas al cambio climático contribuyen para amplificar la capacidad de recuperación y adaptación
9. El cambio climático es, sin embargo, solo uno de los muchos inductores de cambio. Los efectos del cambio climático no pueden desvincularse de los múltiples cambios sociales, políticos, económicos y medioambientales que afrontan actualmente las comunidades indígenas y marginadas. Estos impactos interactúan entre sí provocando efectos exacerbantes y en cascada.

la tierra para hacer frente a las deficiencias de humedad asociadas con el cambio climático y reducir el riesgo de degradación de la tierra agrícola (Mapfuno *et al.* 2013).

Así haya sido reconocido o no por la comunidad científica, este conocimiento ancestral constituye la base para las innovaciones y tecnologías agrícolas actuales y futuras. Durante años los agroecólogos han afirmado que los nuevos modelos de agricultura que la humanidad necesitará en el futuro inmediato deberían estar enraizados en los fundamentos ecológicos de la agricultura tradicional a pequeña escala, que representa formas de agricultura que son de larga data, exitosas y adaptables (Altieri 2004). Dada la resiliencia de los sistemas agrícolas diversificados a pequeña escala, la comprensión de las características agroecológicas de los agroecosistemas tradicionales es urgente, ya que pueden servir de base para el diseño de sistemas agrícolas que sean resilientes al cambio climático (Swiderska 2011).

5. EL ROL ECOLÓGICO DE LA BIODIVERSIDAD EN LOS AGROECOSISTEMAS

En los sistemas agrícolas, el nivel existente de biodiversidad puede marcar la diferencia entre que el sistema se estrese o sea resiliente al enfrentarse a perturbaciones bióticas o abióticas. En todos los agroecosistemas se requiere una diversidad de organismos para que funcione el ecosistema y para proporcionar servicios ambientales (Altieri y Nicholls 2004). Cuando se simplifican los agroecosistemas, se eliminan grupos funcionales completos de especies, cambiando el equilibrio del sistema de un estado deseado a uno menos deseado, afectando su capacidad para responder a los cambios y generar servicios ecosistémicos (Folke 2006). Dos categorías de diversidad pueden ser distinguidos en los agroecosistemas: funcional y de respuesta. La diversidad funcional se refiere a la variedad de organismos y los servicios ecosistémicos que proporcionan para que el sistema siga funcionando (Loreau *et al.* 2001). La diversidad de respuesta es la diversidad de las respuestas al cambio ambiental entre las especies que contribuyen a la misma función del ecosistema. Un agroecosistema que contiene un alto grado de diversidad de respuesta será más resiliente a diversos tipos y grados de perturbaciones (Cabell y Oelofse 2012).

La biodiversidad incrementa la función de los ecosistemas porque diferentes especies o genotipos realizan funciones ligeramente diferentes y por lo tanto tienen diferentes nichos (Vandermeer *et al.* 1988). En general hay muchas más especies que funciones de manera que muchos agroecosistemas exhiben redundancia. Por lo tanto, la biodiversidad incrementa la función de los ecosistemas porque esos componentes que parecen ser redundantes en algún momento se vuelven importantes cuando se produce algún cambio en el entorno. La clave

es que cuando se producen cambios en el entorno, las redundancias del sistema permiten que los ecosistemas continúen funcionando y proporcionando servicios. Por otro lado, una mayor diversidad de especies funciona como un amortiguador frente al fracaso debido a las fluctuaciones del entorno al incrementar la capacidad de compensación de los agroecosistemas, ya que si falla una de las especies, otras pueden desempeñar su función, lo que conduce a respuestas comunitarias agregadas y propiedades del ecosistema más predecibles (Lin 2011).

6. INCREMENTAR LA AGROBIODIVERSIDAD PARA REDUCIR LA VULNERABILIDAD

Durante décadas los agroecólogos han sostenido que una estrategia clave para el diseño de una agricultura sostenible es reincorporar la diversidad a las parcelas agrícolas y los paisajes circundantes y manejarla más eficientemente (Altieri y Nicholls 2004). La diversificación se produce de muchas maneras: variedad genética y diversidad de especies como en las mezclas varietales y los policultivos, y en diferentes escalas a nivel de parcelas y paisajes como en el caso de la agrosilvicultura, la integración de cultivos y ganadería, los setos vivos, los corredores, etc., proporcionando a los agricultores una amplia variedad de opciones y combinaciones para la implementación de esta estrategia. A nivel de paisaje la diversificación debe ir acompañada de una serie de actividades complementarias para alcanzar los objetivos de la resiliencia socio-ecológica (Tabla 2).

Varias propiedades ecológicas emergen en agroecosistemas diversificados que permiten que el sistema funcione de tal manera que se mantenga la fertilidad del suelo, la producción de cultivos, y la regulación de plagas. Existen muchas prácticas de manejo agroecológico que aumentan la diversidad y complejidad de los agroecosistemas como base para la calidad del suelo, la salud de las plantas y la productividad de los cultivos. Muchos entomólogos y patólogos vegetales creen que la diversidad específica inter (especies) e intra (genética) reduce la vulnerabilidad de los cultivos a enfermedades específicas e insectos plaga. Existe una gran cantidad de literatura que documenta que en los sistemas diversos de cultivo (mezclas varietales, policultivos, sistemas agroforestales, etc.) hay una menor incidencia de plagas de insectos y una desaceleración de la velocidad en que se desarrollan las enfermedades, lo que resulta en menores daños a los cultivos y mayor rendimiento de los cultivos mixtos en comparación con los monocultivos equivalentes (Francis 1986, Altieri 2002, Altieri y Nicholls 2004).

Swiderska *et al.* (2011) encontraron que el mantenimiento de diversas variedades tradicionales de cultivos (maíz, papas, arroz) y el acceso a semillas es esencial para la adaptación y la supervivencia de los agricultores pobres de China, Bolivia y Kenia. Incluso

Tabla 2. Resultados esperados y actividades potenciales de la red COMDEKS como estrategia para incrementar resiliencia a nivel de paisaje.

Resultados esperados y actividades potenciales de la red COMDEKS como estrategia para incrementar resiliencia a nivel de paisaje	
Resultados esperados a nivel de paisaje	Actividades recomendadas para obtener resultados
Manutención e incremento de la biodiversidad y servicios ecosistémicos	a) Restauración de bosques; b) Conservación de suelos y sistemas mejorados de manejo de agua; c) Restauración de humedales; d) Remoción de especies invasoras; e) Sistemas de pequeña escala de recarga de acuíferos
Más sistemas sostenibles de producción y mayor seguridad alimentaria	a) Diversificación de paisajes (e.g., agroforestaría); b) Diversificación de sistemas de producción (e.g., mayor diversidad de cultivos e integración de cultivos, animales y árboles); c) Sistemas agroecológicos de bajo insumo; d) Establecimiento de bancos de semillas comunitarios
Sistemas de vida sustentables; mayores ingresos familiares	a) Actividades que promueven acceso a mercados amigables a la biodiversidad; b) Actividades que promueven ecoturismo que genera ingresos a las comunidades locales; c) Actividades que diversifican los modos de vida aumentando y proveyendo alternativas viables a la agricultura de subsistencia
Mejor gobernanza a nivel del paisaje o territorios	a) Actividades que promueven sistemas de gobernanza participativa para tomar decisiones e implementar estrategias a nivel de paisaje; b) Fortalecer las organizaciones de base y ONGs para un mejor manejo y gobernanza del paisaje; c) Promoción de redes para acciones colectivas, aprendizaje y comercio; d) Establecimiento de lazos colaborativos con agencias gubernamentales de gobierno, municipalidades, instituciones académicas y el sector privado.

cuando se les siembra junto a cultivos modernos, aún se conservan las variedades tradicionales, proporcionando una reserva en caso de eventualidades cuando las condiciones no son favorables. Por ejemplo en China, cuando los agricultores de quince municipios diferentes cultivaron cuatro mezclas distintas de variedades de arroz en más de 3,000 hectáreas, sufrieron una incidencia 44% menor de “blast” (piriculariosis) y tuvieron un rendimiento 89% mayor que las parcelas homogéneas sin la necesidad de utilizar fungicidas (Zhu *et al.* 2000). El mantener una diversidad de especies en las parcelas actúa como amortiguador frente a las plagas de insectos y también frente al clima incierto. En Kenia, los científicos del Centro Internacional de Fisiología y Ecología de los Insectos (ICIPE) desarrollaron un sistema de “push-pull” (empuje y tiro) que utiliza dos tipos de cultivos que se siembran junto con el maíz: una planta que repele a estos barrenadores (el empuje) y otro que los atrae (el tiro) (Khan *et al.* 1998). Dos de los cultivos trampa más útiles que atraen (tiran) a los enemigos naturales de los barrenadores como la avispa parásita (*Cotesia sesamiae*), son el pasto elefante y el pasto Sudán, ambas plantas forrajeras importantes que se les siembra como borde alrededor del maíz. Dos excelentes cultivos que repelen a los barrenadores, y que se siembran entre las filas de maíz, son el pasto gordura (molasses grass), que también repele a las garrapatas, y la leguminosa *Desmodium uncinatum*, que además puede suprimir la maleza parásita *Striga* por un factor de 40 en comparación con el monocultivo de maíz. La capacidad de fijación de N de *Desmodium* incrementa la fertilidad del suelo con el resultado de un aumento del 15-20 % en el rendimiento de maíz. También es un excelente forraje (Khan *et al.* 1998).

Dado el rol positivo de la biodiversidad para proporcionar estabilidad a los agroecosistemas, muchos investigadores han afirmado que el incrementar la diversidad de los cultivos será aún más importante en un futuro en el que habrá oscilaciones climáticas dramáticas. Una mayor diversidad en los agroecosistemas puede servir de amortiguador frente a los patrones cambiantes de las precipitaciones y la temperatura, y posiblemente revertir las tendencias a la baja de los rendimientos a largo plazo conforme una variedad de cultivos y variedades responden de manera diferente a estas perturbaciones (Altieri y Koohafkan 2013).

6.1 Diversidad de plantas y resiliencia

Los sistemas agrícolas diversificados tales como los sistemas agroforestales, silvopastorales y de policultivo proporcionan una variedad de ejemplos de cómo los agroecosistemas complejos pueden adaptarse y resistir los efectos del cambio climático. Los sistemas agroforestales son ejemplos de sistemas agrícolas con alta complejidad estructural que han demostrado proteger a los cultivos de las grandes fluctuaciones de temperatura manteniéndolos más próximos a sus condiciones óptimas (Lin 2011). Los sistemas de café bajo la sombra han demostrado que pueden proteger a los cultivos de la disminución de las precipitaciones y la reducción de la disponibilidad de agua del suelo porque la cobertura arbórea puede reducir la evaporación del suelo y aumentar la infiltración de agua en el suelo (Lin 2007).

El cultivo intercalado permite a los agricultores producir varios cultivos simultáneamente y minimizar los riesgos (Vandermeer 1989). Los policultivos manifiestan una mayor estabilidad del rendimiento y una menor disminución de la productividad durante las sequías que

los monocultivos. Natarajan y Willey (1986) examinaron el efecto de las sequías sobre los rendimientos logrados con policultivos manipulando el estrés hídrico en cultivos intercalados de sorgo y maní, mijo y maní y sorgo y mijo. Todos los cultivos intercalados rindieron consistentemente más que los monocultivos en cinco niveles de disponibilidad de humedad, que variaron desde 297 hasta 584 mm de agua aplicada a lo largo de la campaña agrícola. Interesantemente, la tasa de mayor rendimiento aumentó con la escasez de agua, de manera que las diferencias relativas en la productividad de los monocultivos y los policultivos se fueron acentuando más conforme aumentaba el estrés (Natarajan y Willey 1986).

Los sistemas silvopastorales intensivos (SSI) son una forma sostenible de agrosilvicultura para la producción de ganado que combina arbustos forrajeros sembrados a altas densidades, árboles y palmeras y pastos mejorados. La alta densidad de población ganadera y la producción natural de leche y carne en estos sistemas se logran a través del pastoreo rotativo con cercos eléctricos y un suministro permanente de agua para el ganado. En la granja El Hatico en el Valle del Cauca, Colombia, un SSI de cinco pisos compuesto de una capa de hierbas, arbustos de *Leucaena*, árboles medianos y un dosel de árboles de gran altura ha permitido que a lo largo de los últimos 18 años se haya podido aumentar la carga animal a 4.3 vacas lecheras por ha-1 e incrementar la producción de leche en un 130%, además de eliminar completamente el uso de fertilizantes químicos. 2009 fue el año más seco de los 40 años de existencia de El Hatico, con una caída en las precipitaciones de 44% respecto al promedio histórico. A pesar de una reducción del 25% en la biomasa de los pastos, la producción de forraje de árboles y arbustos se mantuvo constante durante todo el año neutralizando los efectos negativos de la sequía en todo el sistema. Como respuesta a las condiciones meteorológicas extremas, la granja tuvo que modificar su densidad ganadera y aumentar el suplemento de energía. A pesar de esto, la producción de leche de la granja en 2009 fue la mayor registrada con un sorprendente aumento del 10% en comparación con los cuatro años anteriores. Mientras tanto, los agricultores de otras partes del país reportaron pérdidas severas en el peso de los animales y altas tasas de mortalidad por hambre y sed. El rendimiento productivo de El Hatico durante este período excepcionalmente caluroso y seco de El Niño (Oscilación del Sur) ilustra el enorme potencial de los SSI como estrategia sostenible de intensificación para la adaptación y la mitigación del cambio climático (Murgueitio *et al.* 2011). Los beneficios combinados de la regulación del agua, un microclima favorable, la biodiversidad y las reservas de carbono en los sistemas agrícolas diversificados descritos anteriormente no sólo proporcionan bienes y servicios ambientales para los productores, sino también una mayor resiliencia al cambio climático.

6.2 Restaurando la diversidad en monocultivos a gran escala

Aunque las ideas contemporáneas de la agricultura mecanizada moderna connotan la necesidad de los monocultivos, se podría desarrollar tecnología adecuada para mecanizar sistemas de cultivos múltiples a gran escala (Horwith 1985). Los grandes agricultores podrían aplicar esquemas de diversificación más simples basados en 2-3 especies de plantas que podrían manejarse usando equipos modernos (Machado 2009). Uno de estos sistemas es el cultivo intercalado en franjas, que consiste en la producción de más de un cultivo en franjas que son lo suficientemente estrechas como para que los cultivos interactúen, pero a la vez lo suficientemente anchas como para permitir el laboreo mecánico. Agronómicamente los sistemas de cultivo intercalado en franjas han incluido generalmente maíz o sorgo, que responden sin problemas ante las mayores intensidades de luz. Los estudios con franjas de maíz y soya de 4 a 12 filas de ancho han demostrado un aumento en el rendimiento de maíz (+5 a +26%) y una disminución en el rendimiento de soya (-8,5 a -33%), conforme las franjas son más estrechas. Alternar franjas de maíz y alfalfa resultó en un mayor rendimiento bruto que el producir cada cultivo independientemente. Las franjas de veinte pies de ancho fueron las más ventajosas, produciendo un rendimiento económico considerablemente mayor que el de los cultivos producidos independientemente (West y Griffith 1992). Esta ventaja es fundamental para aquellos agricultores que tienen niveles de endeudamiento de 40 por ciento o más (\$40 de deuda por cada \$100 de activos). Ese nivel ya ha sido alcanzado por más de 11-16 por ciento de los agricultores del medio oeste de los EEUU, quienes necesitan desesperadamente disminuir los costos de producción adoptando estrategias de diversificación (Francis *et al.* 1986).

La producción de cultivos bajo el sistema de labranza cero o mínima también es prometedora debido a sus efectos sobre la conservación del suelo y la mejora potencial de la humedad por el rastrojo que este sistema deja sobre el suelo y que actúa como mulch. Aunque estos sistemas dependen en gran medida de herbicidas, hay algunos agricultores orgánicos que los practican sin herbicidas sintéticos. Se produjo un avance importante con el descubrimiento de que ciertos cultivos de cobertura anuales de invierno, especialmente el centeno y la veza vellosa, pueden ser aplastados segándolos con un innovador rodillo/alizador (rolo-faca en portugués) utilizado en la siembra directa en una etapa suficientemente tardía de su desarrollo y luego cortados al ras de la tierra. Estas plantas por lo general no vuelven a crecer de forma significativa y los recortes de biomasa forman un mantillo *in situ* a través del cual se pueden sembrar granos o trasplantar hortalizas sin labranza o con labranza mínima. El mantillo dificulta la germinación de las semillas de malezas y la emergencia de plan-

tines, a menudo por varias semanas. A medida que se van descomponiendo muchos residuos de los cultivos de cobertura liberan compuestos alelopáticos que tienen el potencial de suprimir el crecimiento de malezas (Moyer 2010). Esta inhibición es causada por sustancias fitotóxicas (alelopáticas) que son liberadas en forma pasiva a través de la descomposición de los residuos de las plantas. Existe una larga lista de especies de abono verde que tienen efectos fitotóxicos. Este efecto es por lo general suficiente para retrasar el crecimiento de malezas hasta después del período mínimo en que el cultivo debe estar libre de malezas, lo que hace que la labranza posterior, los herbicidas o el deshierbe a mano sean innecesarios, y aun así obtener rendimientos aceptables. Los tomates y algunas variedades de Brassica sembradas hacia el final de la primavera rinden especialmente bien, y algunos cultivos de semillas grandes tales como el maíz y los frijoles pueden ser sembrados directamente a unos 2 - 3 cm de profundidad con éxito en los residuos de los cultivos de cobertura. No sólo pueden los cultivos de cobertura sembrados en las parcelas de labranza cero fijar nitrógeno a corto plazo, sino que también pueden reducir la erosión del suelo y mitigar los efectos de las sequías a largo plazo, puesto que el mantillo conserva la humedad del suelo. Los cultivos de cobertura contribuyen a una mejor estructura vertical del suelo promoviendo el que haya macroporos profundos en el suelo, lo que permite que más agua penetre durante los meses de invierno y se incremente de esta manera el almacenamiento de agua en el suelo (Altieri *et al.* 2011).

6.3 Rendimiento de los agroecosistemas biodiversos en caso de eventos climáticos extremos

Un estudio realizado en laderas centroamericanas después del huracán Mitch demostró que los agricultores que utilizaban prácticas de diversificación tales como cultivos de cobertura, cultivos intercalados y agroforestería sufrieron menos daños que sus vecinos que producían monocultivos convencionales. El estudio, liderado por el movimiento Campesino a Campesino, movilizó a 100 equipos de agricultores-especialistas para trabajar en parejas y realizar observaciones de indicadores agroecológicos específicos en 1,804 granjas sostenibles y convencionales. El estudio abarcó 360 comunidades y 24 departamentos en Nicaragua, Honduras y Guatemala. Se encontró que las parcelas diversificadas tenían de 20 a 40% más tierra vegetal, más humedad en el suelo y menos erosión y que experimentaron pérdidas económicas menores que las de sus vecinos convencionales (Holt-Gimenez 2002). Del mismo modo en Sotonusco, Chiapas, los sistemas de café que exhibían niveles altos de complejidad vegetal y diversidad de plantas sufrieron menos daños por el huracán Stan que los sistemas de café más simplificados (Philpott *et al.* 2009).

Cuarenta días después de que el huracán Ike azotara Cuba en 2008, los investigadores realizaron una inspección de granjas en las provincias de Holguín y Las Tunas y encontraron que las granjas diversificadas exhibieron pérdidas de productividad del 50% en comparación con el 90 o el 100% en los monocultivos vecinos. Además las granjas manejadas agroecológicamente mostraron una recuperación de la producción más rápida (80 a 90% 40 días después del huracán) que las granjas dedicadas al monocultivo (Rosset *et al.* 2011).

Todos estos estudios enfatizan la importancia de incrementar la diversidad vegetal y la complejidad de los sistemas agrícolas para reducir la vulnerabilidad a los eventos climáticos extremos. Las observaciones anteriores han reafirmado el reconocimiento de que la biodiversidad es esencial para mantener el funcionamiento de los ecosistemas y apunta a la utilidad de las estrategias de diversificación de los cultivos utilizados por agricultores tradicionales como una importante estrategia de aumento de resiliencia en los agroecosistemas (Altieri y Nicholls 2013).

7. MANEJO DEL SUELO Y RESILIENCIA

7.1 Mejora de la materia orgánica del suelo

Muchos agricultores tradicionales y orgánicos adicionan regularmente grandes cantidades de materiales orgánicos en forma de abonos animales, compost, hojas de árboles, cultivos de cobertura, leguminosas en rotación que dejan grandes cantidades de residuos, etc., como estrategia clave para mejorar la calidad del suelo. La materia orgánica del suelo (MOS) y su manejo son fundamentales para crear suelos saludables con una actividad biológica dinámica y buenas características físicas y químicas. Es de la mayor importancia para la resiliencia que la MOS mejore la capacidad de retención de agua del suelo incrementando la tolerancia de los cultivos a las sequías y que incremente el nivel de infiltración para disminuir la escorrentía evitando que las partículas del suelo sean transportadas por el agua durante las lluvias intensas. La MOS también mejora la agregación del suelo superficial sosteniendo firmemente las partículas de tierra durante las lluvias o tormentas de viento. Los conglomerados estables resisten el movimiento por el viento o el agua (Magdoff y Weil 2004).

Los suelos orgánicamente ricos suelen contener hongos micorrízicos simbióticos, en especial hongos micorrízicos arbusculares (MA), que forman un componente clave de las poblaciones microbianas que influyen en el crecimiento de las plantas y la productividad del suelo. Los hongos MA son importantes para la agricultura sostenible porque hacen que mejore la relación entre las plantas y el agua y de esta manera incrementan la resistencia a las sequías de las plantas hospederas (Garg y Chandel 2010). La capacidad de asociaciones específicas de hongos-plantas para tolerar las sequías son de gran interés en las zonas

afectadas por la falta de agua, ya que se ha reportado que una infección de hongos MA aumenta la absorción de nutrientes en plantas que sufren de estrés hídrico, permite que las plantas utilicen el agua de manera más eficiente y aumenta la conductividad hidráulica de las raíces.

La productividad de los cultivos en condiciones de secano está limitada en gran medida por la disponibilidad de agua del suelo. El contenido de MOS es un índice confiable de la productividad de los cultivos en las regiones semiáridas porque la MOS contribuye al crecimiento de los cultivos mejorando la capacidad del suelo para almacenar y transmitir aire y agua, ayudando a los cultivos a incrementar su resistencia a las sequías. En un estudio de las pampas semiáridas de Argentina, los investigadores descubrieron que el rendimiento de trigo se relacionó tanto con la retención de agua del suelo como con el contenido total de C orgánico en las capas superiores (0-20 cm) en los años cuando la disponibilidad de humedad fue baja. La dependencia del rendimiento de trigo de la retención de agua en el suelo y del contenido de C cuando existe un déficit de agua se relaciona con el efecto positivo de los componentes orgánicos del suelo sobre el agua disponible para las plantas. Las pérdidas de 1 Mg MOS ha fueron asociados con una disminución en el rendimiento de trigo de aproximadamente 40 kg/ha. Estos resultados demuestran la importancia del uso de prácticas culturales que incrementan la MOS para minimizar las pérdidas de C orgánico del suelo en entornos semiáridos (Díaz Zorita *et al.* 1999).

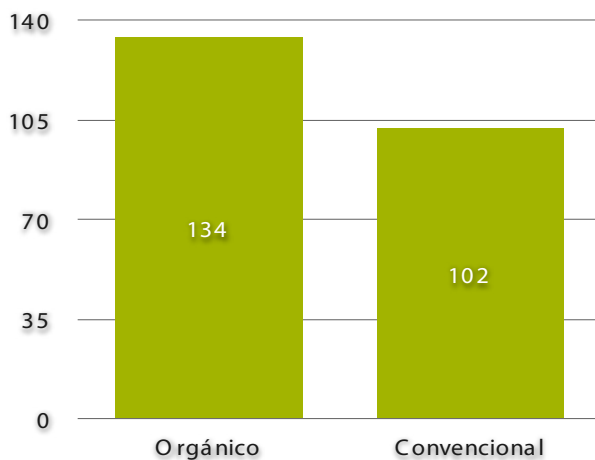


Figura 1. Rendimiento promedio de maíz en sistemas orgánicos y convencionales en años de sequía moderada en Pensilvania, USA (Rodale Institute 2011).

En lo que se considera la comparación directa más completa y de largo plazo entre la agricultura orgánica y la química realizada en los EEUU, investigadores compararon desde 1981 el rendimiento de maíz y de soya durante la transición de agricultura química a agricultura orgánica (Rodale Institute 2012). Ellos descubrieron que

el rendimiento del maíz orgánico fue 31% más alto que el convencional en aquellos años en que hubo sequía. Este rendimiento durante las sequías es notable si se le compara con el de variedades "tolerantes a la sequía" creadas mediante la ingeniería genética, que fue sólo 6,7% a 13,3% mayor respecto a las variedades convencionales (no resistentes a la sequía) (Fig. 1).

7.2 Manejo de la cobertura del suelo

Proteger al suelo de la erosión y el desecamiento, a la vez que incrementar los niveles de humedad del suelo y la circulación del agua es una estrategia fundamental para aumentar la resiliencia de los agroecosistemas. Los mantillos de cultivos de cobertura y los abonos verdes tienen un gran potencial agroecológico puesto que estas prácticas conservan el suelo, mejoran su biología, estabilizan e incrementan el rendimiento de los cultivos y la conservación del agua. Los mantillos de rastrojo interrumpen el proceso de secado del suelo al proteger su superficie con residuos. Los mantillos reducen la velocidad del viento superficial hasta en 99% y, por lo tanto, las pérdidas debidas a la evaporación se reducen significativamente. Además, los cultivos de cobertura y los residuos de las malezas pueden incrementar la penetración del agua y disminuir las pérdidas por escorrentía de 2 a 6 veces. El sistema de frijol tapado es un antiguo sistema de tumba/mantillo común en las laderas de América Central (Buckles *et al.* 1998). Este sistema de agricultura migratoria permite de 3 a 5 meses de producción de frijol por año, aprovechando la alta precipitación y la humedad residual que mantiene el mantillo después de las lluvias. El manejo del frijol tapado consiste primero en seleccionar la parcela adecuada, luego cortar senderos a través de la vegetación para crear accesos para la siembra, esparcir las semillas al voleo en grandes cantidades (25 a 40 kg de semilla ha⁻¹) y cortar la vegetación de barbecho cosa que cubra las semillas de frijol. El frijol tapado generalmente se cultiva en laderas, preferiblemente de cara al sol de la mañana para que las hojas y las vainas de las plantas de frijol se sequen rápidamente (son susceptibles a enfermedades por podredumbre) y las plantas reciban la mayor cantidad de luz solar, ya que las mañanas son por lo general soleadas y la lluvia suele caer en la tarde. Los agricultores buscan parcelas con una cobertura de hierbas altas o arbustos bajos; debe haber suficiente material vegetal como para proporcionar un mantillo que pueda cubrir el suelo completamente. Se evitan las áreas dominadas por pastos puesto que éstos vuelven a crecer rápidamente y compiten fuertemente con los frijoles. Las parcelas se dejan sin tocar hasta el momento de la cosecha. Típicamente el mantillo no es tan grueso como para que sólo unas pocas semillas de frijol germinen y sobrevivan, dando como resultado un bajo rendimiento, pero a la vez lo suficientemente grueso como para mantener la humedad del suelo y protegerlo contra la erosión. La ausencia de la quema y la labranza y la presencia de un mantillo grueso impiden la germina-

ción y el crecimiento de malezas. El período de barbecho reduce los patógenos en el suelo y el mantillo protege a las plantas de frijol de salpicaduras de partículas de tierra durante las lluvias. El sistema está adaptado a los ecosistemas frágiles de las laderas. El suelo no es perturbado por la labranza y el mantillo lo protege de la erosión. Además, el sistema radicular de las plantas naturales se deja intacto, por lo que después del cultivo de frijol esta vegetación rebrota rápido reduciendo aún más el riesgo de erosión y restableciendo la fertilidad del suelo (Buckles *et al.* 1998).

En un esfuerzo por emular y mejorar el sistema de frijol tapado, a lo largo de todo Centro América varias organizaciones no gubernamentales han promovido el uso de leguminosas de grano como abono verde, una fuente barata de fertilizante orgánico para acumular materia orgánica (Altieri 1999b). Cientos de agricultores de la costa norte de Honduras han usado frijol terciopelo (*Mucuna pruriens*) con excelentes resultados que incluyen rendimientos de maíz de alrededor de 3,000 kg ha⁻¹, más del doble que el promedio nacional, a la vez que controlan la erosión, suprimen malezas y reducen costos asociados a la preparación de la tierra. Los frijoles terciopelo producen cerca de 30 t ha⁻¹ de biomasa por año, con un aporte de alrededor de 90-100 kg N ha⁻¹ año⁻¹ (Flores 1989). El sistema disminuye el estrés por sequía gracias a que la capa de mantillo dejada por la *Mucuna* ayuda a conservar el agua en el perfil del suelo, haciendo que los nutrientes estén disponibles de manera inmediata en sincronía con los períodos de mayor absorción de los cultivos (Bunch 1990).

Aprovechando las redes de agricultor a agricultor que están bien establecidas, como el movimiento Campesino a Campesino en Nicaragua y en otros lugares de Centro América, esta sencilla tecnología se ha propagado rápidamente. En sólo un año, más de 1,000 campesinos recuperaron tierras degradadas en la cuenca del río San Juan en Nicaragua (Holt-Giménez 1996). En Cantarranas, Honduras, donde hubo una adopción masiva del frijol terciopelo, la producción de maíz se triplicó a 2500 kg ha⁻¹ a la vez que los requerimientos de mano de obra para el deshierbe se redujeron en un 75%. En Centro América y México, un estimado de 200,000 agricultores están utilizando unas 14 especies diferentes de abono verde y cultivos de cobertura (Bunch 1990).

En la actualidad, más de 125,000 agricultores están utilizando abonos verdes y cultivos de cobertura en Santa Catarina, Brasil. Los agricultores familiares modificaron el sistema de labranza cero convencional en las laderas dejando inicialmente residuos vegetales sobre la superficie del suelo y notando primero reducciones en la erosión y menos fluctuaciones en la humedad y la temperatura del suelo. Luego los agricultores observaron que las aplicaciones repetidas de biomasa fresca mejoran la calidad del suelo, minimizan la erosión y el crecimiento de malezas e incrementan el rendimiento de los cultivos. Estos novedosos sistemas se basan en

mezclas de cultivos de cobertura tanto en verano como en invierno que dejan una capa gruesa de mantillo sobre la cual, luego de que se esparcen encima los cultivos de cobertura, los cultivos de grano tradicionales (maíz, frijol, trigo) y hortalizas como cebollas y tomates, son sembrados o plantados directamente, sufriendo muy poca interferencia de malezas durante el periodo de crecimiento y alcanzando niveles de rendimiento agrónomicamente aceptables (Altieri *et al.* 2011). Durante el ciclo agrícola 2008-2009, en el que hubo una grave sequía, los productores convencionales de maíz sufrieron pérdidas promedio de 50%, alcanzando niveles de productividad de 4,500 kilos por hectárea. Sin embargo, los productores que habían optado por prácticas agroecológicas de labranza cero experimentaron pérdidas menores de alrededor de 20%, confirmando la mayor resiliencia de estos sistemas en comparación con aquellos que utilizan agroquímicos (Petersen *et al.* 1999).

7.3 Cosecha de agua

En muchas partes del mundo, como en el África subsahariana, el 40% de las tierras de cultivo se encuentra en sabanas semiáridas y subhúmedas que sufren cada día más de la escasez de agua. En la mayoría de los años, sin embargo, hay más que suficiente agua como para potencialmente producir cultivos. El problema es que la lluvia se concentra en 2-3 meses del año y/o que grandes volúmenes de agua se pierden por la escorrentía superficial, la evaporación del suelo y la percolación profunda. El reto es cómo capturar esa agua, almacenarla en el suelo y que esté disponible para los cultivos en épocas de escasez. En gran parte del mundo en desarrollo se ha registrado una variedad de técnicas para la cosecha de agua de lluvias y de crecidas (Reij *et al.* 1996, Barrow 1999).

Un antiguo sistema de cosecha de agua conocido como "zai" está siendo recuperado en Mali y Burkina Faso. Los zai son hoyos que los agricultores cavan en la tierra árida, a menudo tan dura como la roca, en la que el agua no podría penetrar de otra manera. Los hoyos tienen típicamente una profundidad de entre 10 a 15 cm y un diámetro de entre 20 a 30 cm y se les llena con materia orgánica (Zougmore *et al.* 2004). La aplicación de abono en los hoyos mejora aún más las condiciones de cultivo y simultáneamente atrae a termitas que cavan canales mejorando la estructura del suelo al permitir que más agua pueda infiltrarse y ser retenida. Al digerir la materia orgánica, las termitas hacen que los nutrientes estén más fácilmente disponibles para las plantas. En la mayoría de casos los agricultores cultivan mijo o sorgo o ambos en los zai. A veces los agricultores siembran árboles junto con los cereales en el mismo zai. Al momento de la cosecha, los agricultores cortan los tallos a una altura de alrededor de 50-75cm, protegiendo a los árboles jóvenes de los animales que pastan. Los agricultores usan entre 9,000 y 18,000 hoyos por hectárea, con aplicaciones de compost que van de 5,6 a 11 t/ha (Critchley *et al.* 2004).

A lo largo de los años, miles de agricultores de la región de Yatenga en Burkina Faso han utilizado esta técnica mejorada localmente para recuperar cientos de hectáreas de tierras degradadas. Los agricultores se han vuelto cada vez más interesados en los zai conforme han ido observando que los hoyos recogen y concentran el agua de escorrentía eficientemente y funcionan con pequeñas cantidades de abono y compost. El uso de los zai permite a los agricultores ampliar su base de recursos y aumentar la seguridad alimentaria familiar (Reij 1991). Los rendimientos obtenidos en las parcelas manejadas con zai son consistentemente cada vez más altos (van desde 870 hasta 1,590 kg /ha) que los obtenidos en las parcelas sin zai (promedio de 500 a 800 kg/ha).

En Níger, los hoyos de siembra tradicional zai fueron mejorados convirtiéndolos en depósitos de recolección de agua, imitando parte de una tecnología de mejoramiento de suelos utilizada tradicionalmente en otras partes del país y en Burkina Faso. Desde Burkina Faso se ha informado recientemente que las aldeas que adoptaron técnicas de recuperación de tierras tales como el cavar hoyos a través de suelos encostrados y llenar los hoyos con abono y agua han visto aumentar el rendimiento de los cultivos en un 60%, mientras que las aldeas que no adoptaron estas técnicas vieron crecer su rendimiento en cantidades mucho menores a pesar de aumentos muy recientes en el nivel de las precipitaciones (Critchley 1989). En el norte de Nigeria pequeños hoyos cavados en suelo arenoso se llenan de abono para mantener mojados los plantones de árboles trasplantados después de las primeras lluvias.

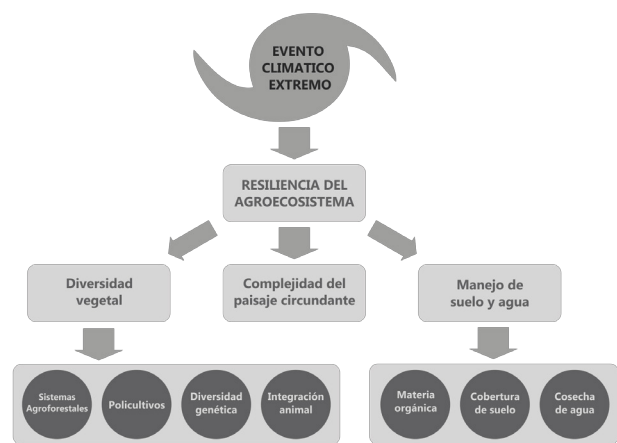


Figura 2. Diversidad paisajística y a nivel de finca y prácticas de manejo y conservación de suelo y agua que incrementan la resiliencia ecológica al cambio climático.

En resumen, la literatura sugiere que los agroecosistemas serán más resilientes cuando estén insertados en una matriz compleja del paisaje, con sistemas de cultivo genéticamente heterogéneos y diversificados, manejados con suelos ricos en materia orgánica y técnicas de

conservación del agua (Fig. 2). Los 60 estudios de caso donde se realizaron las evaluaciones de sostenibilidad en América Latina utilizando el marco MESMIS han confirmado esto (Astier et al. 2012).

8. MARCO CONCEPTUAL PARA EVALUAR LA RESILIENCIA DE LOS SISTEMAS AGRÍCOLAS

La resiliencia se define como la capacidad de un sistema socio-ecológico para absorber perturbaciones conservando su estructura organizacional y su productividad. En otras palabras se refiere a la capacidad de un sistema de auto-organizarse y su habilidad para adaptarse al estrés y al cambio después de una perturbación (Cabell y Oelofse 2012). La resiliencia es el producto de la dinámica de un sistema socio-ecológico cuyas partes constituyentes están integradas y son interdependientes (Adger 2000). La resiliencia puede entenderse como la propensión de un sistema a conservar su estructura organizacional y su productividad después de una perturbación. Por lo tanto, un agroecosistema "resiliente" debería ser capaz de continuar la producción de alimentos al enfrentarse a una sequía severa o al exceso de lluvias. Por el contrario, la vulnerabilidad puede ser definida como la posibilidad de que un agroecosistema pierda biodiversidad, el suelo, el agua o la productividad al enfrentarse a una perturbación o choque externo. La vulnerabilidad se refiere al grado en que un sistema es susceptible e incapaz de hacer frente a los efectos adversos de la variabilidad y los extremos climáticos y denota un estado de susceptibilidad al daño por la exposición al estrés asociado con el cambio ambiental y por la falta de capacidad de adaptación (Folke 2006).

De esta manera el riesgo resultante por la variabilidad climática es el producto de la amenaza, la vulnerabilidad y la capacidad de respuesta tal como se describe en la siguiente ecuación (Nicholls y Altieri 2013):

$$\text{Riesgo} = \frac{\text{Vulnerabilidad}}{\text{Capacidad de Respuesta}} * \text{Amenaza}$$

El riesgo se entiende como cualquier fenómeno natural (sequía, huracán, inundación, etc.), que signifique un cambio en el entorno habitado por una comunidad rural.

La vulnerabilidad está determinada por las características biofísicas de la finca y las condiciones socio-económicas de los agricultores que incrementan o reducen la exposición a la amenaza.

La amenaza es la intensidad, frecuencia, duración y el nivel de impacto del evento climático (es decir, las pérdidas de rendimiento debido a tormentas o sequías.).

La capacidad de respuesta es la capacidad (o falta de) de los sistemas agrícolas y los agricultores para resistir y recuperarse de la amenaza dependiendo del nivel de organización social y las características agroecológicas (es decir, la diversidad de cultivos) de las fincas.

En resumen, para que un evento sea considerado un riesgo dependerá de si en una región en particular existe una comunidad que sea vulnerable a él. Para que el evento se convierta en una amenaza deberá haber una gran probabilidad de que el evento vaya a ocurrir en esa región, y que la amenaza sea devastadora dependerá de la magnitud del evento y el nivel de vulnerabilidad de la comunidad. Esa vulnerabilidad puede reducirse por la "capacidad de respuesta" definida como las características agroecológicas de las fincas y las estrategias de manejo utilizadas por los agricultores para reducir los riesgos climáticos y para resistir y recuperarse de este tipo de eventos. Por lo tanto, la adaptación se refiere a los cambios realizados por los agricultores para reducir los riesgos. La capacidad de los agricultores para adaptarse está basada en las reservas individuales o colectivas de capital humano y social que incluyen atributos tales como los conocimientos tradicionales y las habilidades técnicas y de manejo, los niveles de organización social y las redes de apoyo, etc. Como puede observarse en la Figura 3, el nivel de vulnerabilidad de una granja está determinado por su tipo de infraestructura agroecológica (nivel de heterogeneidad del paisaje, diversidad de cultivos y diversidad genética, calidad y cobertura del suelo, etc.) y las características sociales de la familia o de la comunidad (niveles de organización y establecimiento de redes, autosuficiencia alimentaria, etc.). La vulnerabilidad puede ser reducida por la capacidad de respuesta de los agricultores y de sus fincas, que a su vez determinan su capacidad para resistir eventos y recuperar su función e infraestructura.

Resiliencia socio-ecológica
Habilidad de grupos o comunidades de prepararse y hacer frente a estresores externos y/o perturbaciones como resultado de un cambio ambiental, socioeconómico o político, y que se refleja en acciones colectivas para aplicar diseños agroecológicos resilientes en sus fincas.

9. INTENTOS METODOLÓGICOS PARA EVALUAR LA RESILIENCIA

En 2011 un grupo de agroécólogos latinoamericanos asociados a REDAGRES: "Red IberoAmericana para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático- www.redagres.org" iniciaron un estudio de dos años de varios sistemas agrícolas a pequeña escala en regiones seleccionadas de siete países con el fin de identificar aquellos sistemas que han resistido eventos climáticos recientemente o en el pasado inmediato y comprender cuáles fueron las características agroecológicas de tales sistemas que les permitieron resistir y/o recuperarse de sequías, tormentas, inundaciones o huracanes. Los principios y mecanismos que subyacen a la resiliencia identificados por el estudio luego fueron transmitidos a otros agricultores de la región a través de días de campo en los que los agricultores pudieron visitar las granjas resilientes y discutir entre ellos las características de estas granjas y la forma de replicarlas en otras. También se organizaron visitas recíprocas durante las que los agricultores resilientes pudieron visitar otras comunidades en otras regiones y compartir sus experiencias,



Figura 3. Características socio-ecológicas que determinan la vulnerabilidad y capacidad de respuesta de los agricultores para mejorar la resiliencia de sus sistemas y sus comunidades a cambios externos.

sistemas de manejo y estrategias de resiliencia socio-ecológica. Los investigadores y un grupo de agricultores seleccionados elaboraron un manual compuesto de dos secciones principales: (a) una metodología sencilla con indicadores que permiten a los agricultores evaluar si sus granjas podrían soportar un evento climático severo (sequía o huracán) y con indicaciones sobre qué hacer para aumentar la resiliencia de la granja; y (b) una descripción de los principales principios y prácticas socio-ecológicas que los agricultores familiares pueden utilizar de forma individual o colectiva (a nivel de la comunidad) para mejorar la capacidad de adaptación de los sistemas agrícolas al cambio climático (Nicholls *et al.* 2013).

Utilizando el marco conceptual de resiliencia descrito anteriormente los equipos se dedicaron a la investigación socio-ecológica en los sistemas agrícolas seleccionados en cada país y desarrollaron una metodología para comprender las características agroecológicas de los sistemas agrícolas y las estrategias sociales utilizadas por agricultores que les permitieron resistir y/o recuperarse de sequías, tormentas, inundaciones o huracanes (Nicholls y Altieri 2013). Para ilustrar la aplicación de las metodologías, presentamos información de tres estudios de caso realizados en: (a) Carmen del Viboral, Antioquia, Colombia; (b) Mixteca Alta, Oaxaca, México y (c) Región de la Araucanía, Chile.

9.1 Carmen del Viboral

En este estudio los investigadores evaluaron la resiliencia de 6 granjas (3 manejadas convencionalmente con agroquímicos y sin prácticas de conservación de suelos, y 3 granjas agroecológicamente diversificadas con prácticas de conservación de suelos) que presentaban condiciones similares en cuanto a pendiente y exposición (Henaó 2013).

El equipo desarrolló 6 indicadores para estimar la vulnerabilidad (pendiente, diversidad del paisaje, susceptibilidad del suelo a la erosión) y la capacidad de respuesta (prácticas de conservación de suelos, prácticas de manejo del agua, niveles de diversidad de cultivos, autosuficiencia alimentaria, etc.) en las 3 granjas agroecológicas y las 3 granjas convencionales. Al asignar valores (del 1 al 5, los valores cercanos a 1 o 2 expresan un mayor nivel de vulnerabilidad) a estos indicadores fue posible comparar las granjas en un diagrama tipo ameba (Fig. 4).

Es evidente que las granjas agroecológicas (verdes) eran menos vulnerables que las convencionales (rojas). El equipo también aplicó 13 indicadores para evaluar la capacidad de respuesta demostrada por los agricultores, y de nuevo quedó claro que las granjas agroecológicas (verdes) exhibieron una mayor capacidad de respuesta que las convencionales (rojas) (Fig. 5).

Al aplicar la metodología y ubicar los valores de riesgo en un triángulo, fue evidente que las granjas agroecológicas (puntos verdes en la Figura 6) demostraron un menor nivel de vulnerabilidad debido a su alta capacidad de respuesta respecto a las granjas convencionales (puntos de color naranja en la Figura 6), que demostraron una mayor vulnerabilidad y una menor capacidad de respuesta.

9.2 Mixteca Alta

Este estudio realizado en Oaxaca, México describe cómo pequeños agricultores se adaptaron y prepararon para retos climáticos ya pasados y también lo que están haciendo hoy para lidiar con los recientes aumentos en la temperatura y la intensidad de las lluvias y la llegada más tardía de las mismas (Rogé *et al.* 2014). Los agricultores identificaron 14 indicadores para evaluar la capaci-

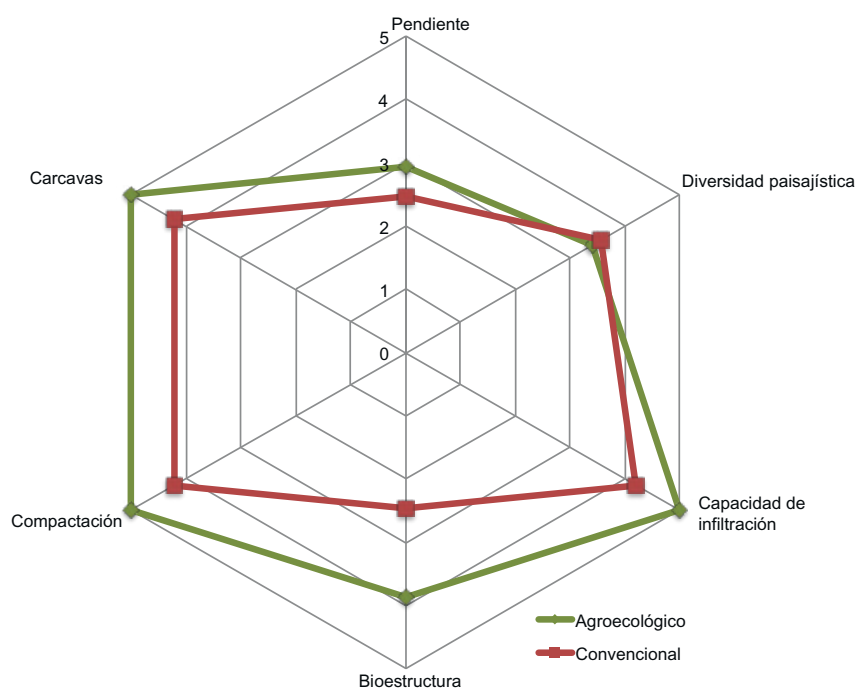


Figura 4. Gráfica de ameba mostrando los valores de vulnerabilidad en fincas convencionales y agroecológicas en Antioquia, Colombia.

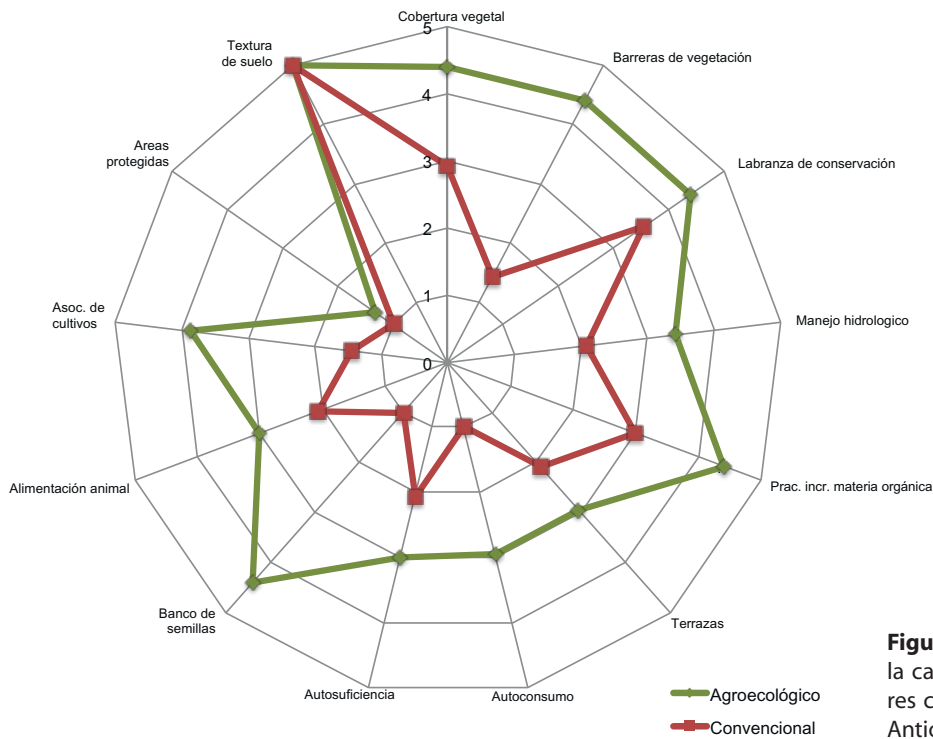


Figura 5. Gráfica de araña que exhibe la capacidad de respuesta de agricultores convencionales y agroecológicos en Antioquia, Colombia.

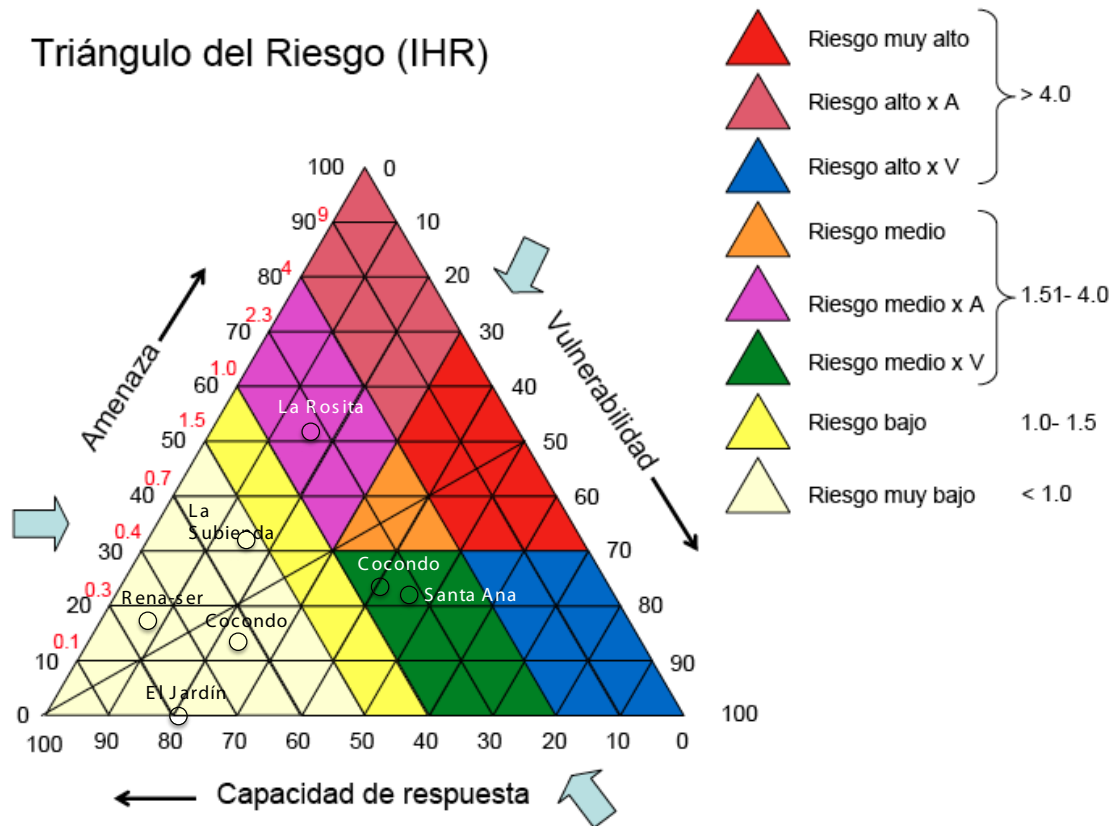


Figura 6. Triángulo ubicando fincas convencionales y agroecológicas según su nivel de vulnerabilidad y capacidad de respuesta en Antioquia, Colombia

dad de adaptación de cuatro agroecosistemas ubicados en las comunidades de Zaragoza y El Rosario usando el formulario descrito en la Tabla 3. Los investigadores combinaron las evaluaciones de los agroecosistemas de cada comunidad asignando puntuaciones numéricas de 0 para marginal (cara triste), 1 para aceptable (cara neutral) y 2 para óptimo (cara feliz). Los agricultores analizaron los resultados dibujando diagramas de barras para las puntuaciones combinadas de su comunidad. Se les alentó a que analizaran los resultados de sus evaluaciones como grupo presentándoles las siguientes preguntas:

- ¿Cómo mantener caras felices (es decir, la condición óptima) en las categorías paisaje, manejo de los agricultores y calidad del suelo?
- ¿Cómo obtener más caras felices (es decir, la condición óptima) que las que ya tienen en las categorías paisaje, manejo de los agricultores y calidad del suelo? En otras palabras como mejorar los indicadores que muestran caras tristes (condición marginal) para que obtengan valores óptimos (caras felices).

A escala del paisaje, los agricultores de Zaragoza observaron que los bordes con vegetación y la vegetación perenne con múltiples usos mitigaron la exposición a eventos climáticos extremos. De manera similar, los agricultores de Coxcaltepec reconocieron que los paisajes heterogéneos y boscosos protegieron a las parcelas trayendo lluvia, reteniendo las aguas subterráneas, acumulando materia orgánica en el suelo y controlando las plagas de insectos. Los participantes de El Rosario describieron que las zanjas de contorno capturan tierra y agua, y que una ligera pendiente en las zanjas de contorno evita las inundaciones y la ruptura de las mismas durante eventos de lluvias fuertes.

Los indicadores de manejo de los agricultores a escala de parcela resaltaron la importancia de la diversidad genética y de especies de los cultivos para estabilizar los rendimientos, dada la variación en el rendimiento de los cultivos de un año a otro. El indicador de “mejoras del suelo” se derivó de testimonios de agricultores que indicaron que los fertilizantes sintéticos sólo mejoraron el rendimiento de los cultivos cuando hubo precipitaciones favorables; en los años de sequía los fertilizantes sintéticos no fueron eficaces e “incluso quemaron los cultivos”. Los participantes de Coxcaltepec recomendaron sustituir los fertilizantes sintéticos con varias mejoras del suelo con enmiendas de origen local que incluyeron abonos animales, humus de lombriz, humus de los bosques y orina humana.

Los agricultores afirmaron que la calidad del suelo también afecta el impacto de la variabilidad climática en los agroecosistemas. Las tres comunidades asociaron la retención de la humedad del suelo con la textura y la profundidad del mismo. Por lo general, los suelos arcillosos fueron descritos como los más productivos en años de sequía, pero también difíciles de cultivar en años lluviosos. En cambio los agricultores describieron los suelos arenosos como los más fáciles de cultivar en años lluviosos pero también los menos productivos. Los agricultores consideraron los suelos profundos, medidos por lo mucho que el arado egipcio entra en el suelo, como los más productivos tanto en años lluviosos como secos.

9.3 Región de la Araucanía

En este estudio se evaluaron 177 familias que practican agricultura campesina en la zona de secano de la región de La Araucanía (Chile), diferenciadas de acuerdo a su origen étnico en mapuche, chilenos y descendientes de colonos europeos (Montalba *et al.* 2015). Se

Tabla 3. Formularios utilizados por los agricultores para evaluar sus agroecosistemas en cada comunidad de Zaragoza and El Rosario, México, basándose en 14 indicadores derivados localmente (Rogé *et al.* 2014)

Equipo:				
Comunidad:				
Sistema de Producción:				
Categoría	Indicador	Marginal (cara Triste)	Aceptable (cara neutra)	Optimo (cara feliz)
Paisaje	Composición territorial			
	Rompevientos			
	Ubicación del predio			
	Conservación del suelo			
Manejo del agricultor	Rotación de cultivos			
	Variedades			
	Policultivos			
	Enmiendas			
Calidad del suelo	Labranza			
	Plantas espontáneas			
	Productividad del suelo			
	Materia orgánica			
	Profundidad			
	Textura			

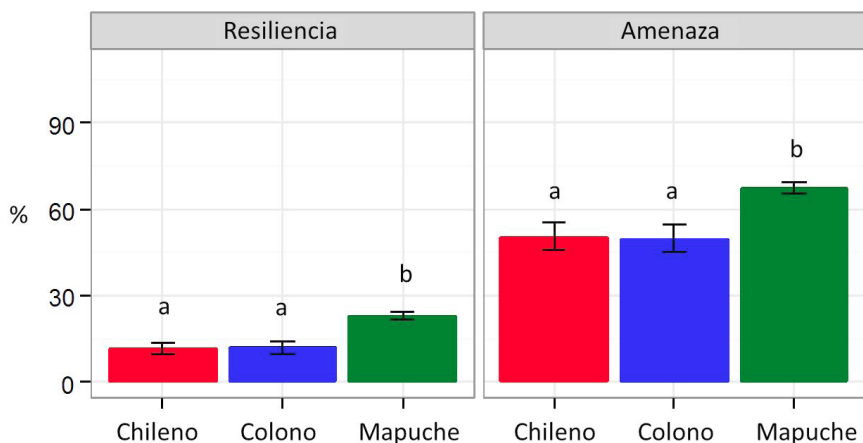


Figura 7. Exposición al riesgo de estrés hídrico (nivel de amenaza) y niveles de resiliencia frente al riesgo de tres grupos campesinos étnicamente diferenciados en la Región de la Araucanía, Chile.

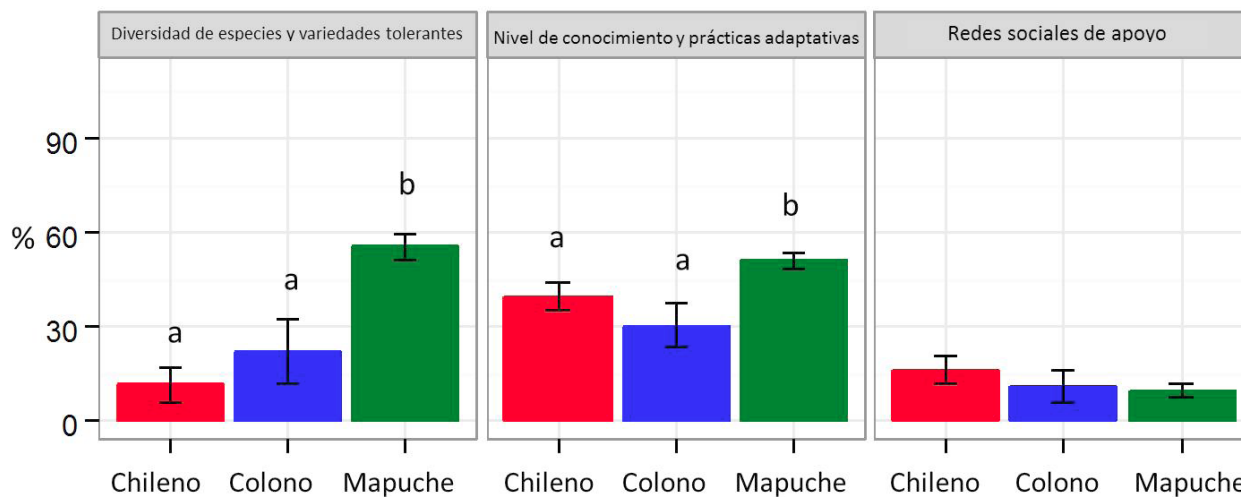


Figura 8. Capacidad de respuesta (o de adaptación) frente al riesgo de estrés hídrico de tres grupos de campesinos étnicamente diferenciados en la Región de la Araucanía, Chile.

identificaron y evaluaron variables asociadas a los niveles de ocurrencia e intensidad de sequías (amenaza) y la vulnerabilidad de los sistemas campesinos ante estos eventos, así como su capacidad de respuesta. Se identificaron tres variables (intensidad y duración de sequía y pérdida de rendimiento) para representar el nivel de amenaza de los sistemas productivos frente al estrés hídrico. El nivel de resiliencia socio-ecológica se representó por 4 variables (% cobertura de plantaciones forestales exóticas circundantes, acceso al agua, ubicación de la finca en la cuenca y contexto agroecológico de las fincas) y tres variables que denotan la capacidad de respuesta para enfrentar y recuperarse de los períodos de estrés hídrico. En relación a las variables de “amenaza”, “vulnerabilidad” y “capacidad de respuesta”, se encontraron diferencias estadísticamente significativas (ANDEVA) entre grupos de campesinos, relacionado principalmente al origen étnico de estos. Como muestra la Figura 7, aunque los campesinos mapuche están más expuestos al riesgo, presentaron una mayor resiliencia que los

chilenos y colonos, lo cual se relaciona al mayor nivel de conocimiento de prácticas específicas de adaptación y la mantención en sus sistemas productivos de una mayor diversidad de especies o variedades tolerantes a la escasez hídrica, a pesar que las redes sociales de apoyo parecen menos desarrolladas entre los campesinos mapuches (Fig. 8).

Las evaluaciones de resiliencia realizadas hasta la fecha por el grupo de REDAGRES sugieren que las estrategias agroecológicas que incrementan la resiliencia ecológica de los sistemas agrícolas son una condición necesaria pero no suficiente para alcanzar la sostenibilidad. Para mejorar la capacidad de los grupos o comunidades para adaptarse frente a estresores ambientales, la resiliencia social debe ir de la mano con la resiliencia ecológica. Para ser resilientes las sociedades rurales deben, por lo general, demostrar la capacidad de amortiguar las perturbaciones con métodos agroecológicos adoptados y difundidos a través de la auto-organización y la acción colectiva. Reducir la vulnerabilidad social a través

de la ampliación y consolidación de las redes sociales, tanto a nivel local como regional, puede contribuir a incrementar la resiliencia del agroecosistema. Como se expresó en la fórmula de riesgo, la vulnerabilidad de las comunidades agrícolas depende de lo bien desarrollados que estén su capital natural y social, lo que a su vez hace que los agricultores y sus sistemas sean más o menos vulnerables a las perturbaciones climáticas. Como ya se menciona la capacidad de adaptación se refiere al conjunto de precondiciones sociales y agroecológicas que permitirán a los individuos o grupos y sus fincas responder al cambio climático de manera resiliente. La capacidad para responder a los cambios en las condiciones ambientales existe en diferentes grados en cada comunidad, pero no siempre todas las respuestas son sostenibles. El reto es identificar las que sí lo son para difundirlas de manera que la vulnerabilidad pueda reducirse aumentando la capacidad de respuesta de las comunidades utilizando mecanismos agroecológicos que permitan a los agricultores resistir y recuperarse de los eventos climáticos. Las estrategias de organización social (redes de solidaridad, el almacenamiento e intercambio de semillas y alimentos, etc.) utilizadas colectivamente por los agricultores para hacer frente a las circunstancias difíciles impuestas por este tipo de evento son, por lo tanto, un componente clave de la resiliencia.

10. CONCLUSIONES

Es más que seguro que los sectores agrícolas de todos los países del mundo deberán enfrentar algún nivel de impacto asociado al cambio climático, de manera que la adaptación es imprescindible. Es esencial que se

tomen medidas para apoyar a los agricultores y las familias dedicadas a la agricultura para que puedan lidiar tanto con la amenaza de la variabilidad del clima, como con los retos que el cambio climático supondrá para las oportunidades futuras de sobrevivencia. El lanzamiento de la Global Alliance for Climate Smart Agriculture (<http://www.un.org/climatechange/summit/wp-content/uploads/sites/2/2014/09/AGRICULTURE-Action-Plan.pdf>) en la Cumbre Climática celebrada en Nueva York en setiembre de 2014 reconoce el imperativo de la adaptación, pero su enfoque para lograr mejoras sostenibles en la productividad y en la creación de resiliencia privilegia principalmente innovaciones tales como la identificación y el desarrollo de genes climáticamente inteligentes para mejorar los cultivos, acompañados de fertilizantes. Este enfoque reduccionista presta poca o nula atención a la agricultura tradicional o los enfoques basados en la agroecología que aquí se describen.

Esto es lamentable en tanto que los sistemas agrícolas tradicionales son depósitos de abundantes conocimientos sobre una serie de principios y medidas que pueden ayudar a que los sistemas agrícolas modernos se vuelven más resilientes a las condiciones climáticas extremas (Altieri y Toledo 2011). Muchas de estas estrategias agroecológicas enumeradas en la Tabla 4 pueden ser implementadas a nivel de fincas para reducir la vulnerabilidad a la variabilidad climática.

Las prácticas de la Tabla 4 incluyen estrategias agroecológicas clave como la diversificación de cultivos, el mantenimiento de la diversidad genética local, la integración de los animales, el manejo orgánico del suelo, la conservación y la cosecha de agua, etc, dentro de un marco de rediseño predial. Un primer paso para avanzar en la

	Incremento de la material orgánica del suelo	Ciclaje de Nutrientes	> cobertura de suelo	Reducción ET	Reducción de escorrentía	> retención de humedad	> infiltración	Regulación Microclimática	Reducción de la compactación de suelos	Reducción de la erosión de suelos	> Regulación hidrológica	> uso eficiente del agua	> redes tróficas de micorrizas
Diversificación													
• Cultivos intercalados			✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓	
• Agroforestería	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	
• Sistema silvopastoral Intensivo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
• Rotación de cultivos	✓	✓	✓		✓		✓		✓	✓		✓	
• Mezcla de variedades locales			✓									✓	
Manejo del Suelo													
• Cultivos de cobertura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
• Abonos verdes	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
• Mulching													
• Aplicaciones de Compost	✓					✓							✓
• Agricultura de labranza cero (orgánica)			✓	✓	✓		✓		✓	✓		✓	
Conservación de suelos													
• Curvas a nivel					✓		✓		✓	✓	✓		
• Barreras vivas			✓		✓		✓		✓	✓	✓		
• Terrazas					✓		✓		✓	✓	✓		
• Pequeñas represas entre las cárcavas					✓		✓		✓	✓	✓		

Tabla 4. Ejemplos de prácticas agroecológicas (diversificación y manejo de suelo) conocidas por su efecto en la dinámica del suelo y el agua pero que a su vez mejoran la resiliencia del agroecosistema.

construcción de la resiliencia es entender las características agroecológicas de los sistemas tradicionales y otros sistemas agroecológicos que han resistido la variabilidad con el paso del tiempo (Dewalt 1994). La cuestión a tratar es discernir qué principios y mecanismos han permitido a estos sistemas resistir y/o recuperarse de sequías, tormentas, inundaciones o huracanes. Estos mecanismos pueden ser descifrados utilizando las metodologías descritas en el presente documento que evalúan la resiliencia socio-ecológica de los sistemas agrícolas y así reforzar la capacidad de respuesta de los agricultores (Fig. 9).



Figura 9. Factores que influyen la vulnerabilidad de agroecosistemas y aspectos relacionados con la capacidad de respuesta de agricultores y sus manejos que disminuyen la vulnerabilidad y el nivel de daño.

El segundo paso es difundir con urgencia creciente los principios y prácticas de resiliencia utilizados por los agricultores exitosos, así como los resultados de estudios científicos que documentan la efectividad de las prácticas agroecológicas que incrementan la resiliencia de los agroecosistemas a los eventos climáticos extremos (sequías, huracanes, etc.). La difusión eficaz de las tecnologías agroecológicas determinará en gran medida qué tan bien y qué tan rápido puedan adaptarse al cambio climático los agricultores. La difusión a los agricultores de comunidades vecinas y otras

en la región puede hacerse por medio de días de campo, visitas recíprocas, seminarios y cursos cortos que se centren en los métodos que explican la forma de evaluar el nivel de resiliencia de cada granja y enseñan qué hacer para mejorar la resistencia tanto a las sequías como a las tormentas fuertes. Sin embargo, la metodología Campesino a Campesino utilizada por miles de agricultores en Mesoamérica y Cuba, que consiste en un mecanismo horizontal de transferencia e intercambio de información, es tal vez la estrategia más viable para difundir las estrategias de adaptación basadas en la agroecología (Holt-Gimenez 1996, Rosset *et al.* 2011).

La mayoría de las investigaciones se centran en la resiliencia ecológica de los agroecosistemas, pero poco se ha escrito sobre la resiliencia social de las comunidades rurales que manejan dichos agroecosistemas. La capacidad de los grupos o comunidades para adaptarse frente a estresores sociales, políticos o ambientales externos debe ir de la mano con la resiliencia ecológica. Para ser resilientes las sociedades rurales deben por lo general demostrar su capacidad para amortiguar las perturbaciones con métodos agroecológicos adoptados y difundidos a través de la auto-organización y la acción colectiva (Tompkins y Adger 2004). El reducir la vulnerabilidad social a través de la ampliación y consolidación de las redes sociales, tanto a nivel local como regional, puede contribuir a incrementar la resiliencia de los agroecosistemas. La vulnerabilidad de las comunidades agrícolas depende de lo bien desarrollado que esté su capital natural y social, lo que a su vez hace que los agricultores y sus sistemas sean más o menos vulnerables a las perturbaciones climáticas (Nicholls *et al.* 2013). La mayoría de las comunidades tradicionales mantiene aún un conjunto de precondiciones sociales y agroecológicas que permiten a sus fincas responder al cambio climático de manera resiliente. La mayoría de las granjas a gran escala tienen una baja capacidad de respuesta a los cambios en las condiciones ambientales, porque en las regiones donde predominan el tejido social se ha roto. El reto será rehabilitar la organización social y las estrategias colectivas en las comunidades dominadas por granjas a mediana y gran escala, incrementando

Tabla 5. Propiedades de agroecosistemas socio-ecológicamente resilientes

Propiedades de agroecosistemas socio-ecológicamente resilientes (Cabell y Oelofse 2012)
Procesos de producción ecológicamente autoregulados vía feedbacks
Alta conectividad entre los componentes bióticos y abióticos
Alta diversidad funcional y responsiva
Alta redundancia
Alta heterogeneidad espacial y temporal a nivel de finca y paisaje
Alta autonomía de control exógeno
Comunidades socialmente auto-organizadas formando configuraciones basados en necesidades y aspiraciones colectivas
Personas reflexivas y que anticipan cambios
Alto nivel de cooperación e intercambio entre miembros de la comunidad
Comunidades que honran el legado y mantienen elementos claves del conocimiento tradicional
Grupos que constantemente construyen capital humano y movilizan recursos a través de redes sociales

así la capacidad de respuesta de los agricultores para implementar mecanismos agroecológicos que les permitan resistir y/o recuperarse de los eventos climáticos. El rediseño de los agroecosistemas con principios agroecológicos conlleva a sistemas con propiedades deseables de resiliencia socio-ecológica (Tabla 5).

Al buscar la adaptación a través de esquemas basados en la agroecología y la soberanía alimentaria, los medios de subsistencia de más de 1,5 billones de pequeños agricultores no sólo se podrán asegurar, sino que muchos de sus sistemas persistirán y servirán como ejemplos de sostenibilidad de los que el mundo debe aprender urgentemente. La transformación y democratización del sistema alimentario mundial es la mejor manera de adaptarse al cambio climático, erradicando al mismo tiempo el hambre y la pobreza, ya que de esa manera se enfrentarían directamente las causas que originan la desigualdad y la degradación ambiental. Los movimientos rurales internacionales tales como la Via Campesina (2010) proporcionan las bases para la transformación del sistema actual, promoviendo y difundiendo principios y prácticas agroecológicas y promoviendo redes de cooperación complejas que transfieren los conocimientos técnicos y políticos a través de las esferas internacionales, desafiando al mismo tiempo a las instituciones globales, los regímenes de comercio internacional y el control corporativo del sistema alimentario.

REFERENCIAS

- Adams MW, Ellingboe AH, Rossman EC. 1971. Biological uniformity and disease epidemics. *BioScience* 21:1067-1070.
- Adams RM, Hurd BH, Lenhart S, Leary N. 1998. Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. *Climate Research* 11: 19-30.
- Adger WM. 2000. Social and ecological resilience: are they related. *Prog Hum Geogr.* September 24:347-364.
- Altieri MA. 1999a. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74: 19-31.
- Altieri MA. 1999b. Applying agroecology to enhance productivity of peasant farming systems in Latin America. *Environment, Development and Sustainability* 1:197-217.
- Altieri MA. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93:1-24.
- Altieri MA. 2004. Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture. *Frontiers in Ecology and Environment* 2: 35-42.
- Altieri MA, Koohafkan P. 2008. Enduring farms: climate change, smallholders and traditional farming communities. *Environment and Development Series 6*. Penang, Third World Network
- Altieri MA, Koohafkan P. 2013. Strengthening resilience of farming systems: A key prerequisite for sustainable agricultural production. En *Wake up before it is too late: make agriculture truly sustainable now for food security in a changing climate*. UNCTAD, TER13 Report. Geneva
- Altieri MA, Lana MA, Bittencourt HV, Kieling AS, Comin JJ, Lovato PE. 2011. Enhancing Crop Productivity via Weed Suppression in Organic No-Till Cropping Systems in Santa Catarina, Brazil. *Journal of Sustainable Agriculture* 35: 855-869.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2004. Biodiversity and pest management in agroecosystems. Second edition. New York: Haworth Press.
- Altieri MA, Toledo VM. 2011. The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies* 38: 587-612.
- Altieri MA, Nicholls CI. 2013. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change DOI 10.1007/s10584-013-0909-y*.
- Armillas P. 1971. Gardens on swamps. *Science* 174:653-656.
- Astier M, García-Barríos L, Galván-Miyoshi Y, González-Esquivel CE, Masera OR. 2012. Assessing the sustainability of small-farmer natural resource management systems. A critical analysis of the MESMIS program (1995-2010). *Ecology and Society* 17(3): 25
- Barrow CJ (1999) *Alternative irrigation: the promise of runoff agriculture*. London: Earthscan Publications, Ltd.
- Buckles D, Triomphe B, Sain G. 1998. *Cover crops in hillside agriculture: farmer innovation with Mucuna*. Ottawa Canada, International Development Research Center
- Bunch R. 1990. Low-input soil restoration in Honduras: the Cantarranas farmer-to-farmer extension project. *Sustainable Agriculture Gatekeeper Series SA23*, London, IIED
- Cabell JF, Oelofse M. 2012. An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. *Ecology and Society* 17(1):18.
- Coakley SM, Scherm H, Chakraborty S. 1999. Climate change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology* 37: 399-426.
- Critchley WRS. 1989. Building on a tradition of rainwater harvesting. *Appropriate Technology* 16(2): 10-12.
- Critchley WRS, Reij C, Willcocks TJ. 2004. Indigenous soil and water conservation: a review of the state of knowledge and prospects for building on traditions. *Land Degradation and Rehabilitation* 5: 293-314.
- Denevan WM. 1995. Prehistoric agricultural methods as models for sustainability. *Advanced Plant Pathology* 11:21-43.

- De Schutter O. 2010. Report submitted by the Special Rapporteur on the right to food. UN General Assembly. Human Rights Council Sixteenth Session, Agenda item 3 A/HRC/16/49.
- Dewalt BR. 1994. Using indigenous knowledge to improve agriculture and natural resource management. *Human Organization* 5: 23-51.
- Diaz-Zorita M, Buschiazzi DE, Peineman N. 1999. Soil Organic Matter and Wheat Productivity in the Semiarid Argentine Pampas. *Agronomy Journal* 91: 276-279.
- Döll P. 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climate Change* 54: 269-293.
- Easterling WE, Aggarwal PK, Batima P, Brander KM, Erda L, Howden SM, Kirilenko A, Morton J, Soussana JF, Schmidhuber J, Tubiello JN. 2007. Food, fiber and forest products. En *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Parry *et al.*, eds). Cambridge UK: Cambridge University Press, pp 273-313.
- Erickson CL, Chandler KL. 1989. Raised fields and sustainable agriculture in Lake Titicaca Basin of Peru. En *Fragile lands of Latin America* (Browder JO, ed). Boulder, CO: Westview Press, pp 230-43.
- Flores M. 1989. Velvetbeans: An alternative to improve small farmers' agriculture. *ILEIA Newsletter* 5: 8-9.
- Folke C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social ecological systems analyses. *Global Environmental Change* 16: 253-267.
- Francis CA. 1986. *Multiple Cropping Systems*. New York: MacMillan.
- Francis CA, Jones A, Crookston K, Wittler K, Goodman S. 1986. Strip cropping corn and grain legumes: A review. *American Journal of Alternative Agriculture* 1: 159-164.
- Franco J, Borrás J, Vervest P, Isakson R, Levidow L. 2014. Towards understanding the politics of flex crops and commodities: Implications for research and policy advocacy. Netherlands, Transnational Institute.
- Fuhrer J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture Ecosystems & Environment* 97(1-3): 1-20.
- Garg N, Chandel S. 2010. Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. *Agronomy for Sustainable Development* 30: 581-599.
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal* 103 (2): 351-370.
- Heinemann JA, Massaro M, Coray DS, Agapito-Tenfen SZ, Wen JD. 2013. Sustainability and innovation in staple crop production in the US Midwest. *International Journal of Agricultural Sustainability* 12(1): 71-88.
- Henao A. 2013. Propuesta metodológica de medición de la resiliencia agroecológica en sistemas socioecológicos: un estudio de caso en Los Andes Colombianos. *Agroecología* 8 (1): 85-91.
- Hillel D, Rosenzweig C. 2009. *Handbook of climate change and agroecosystems: Impacts, adaptation, and mitigation*. London, Singapore, Hackensack, NJ, Imperial College Press
- Holt-Gimenez E. 1996. The campesino a campesino movement: farmer-led, sustainable agriculture in Central America and Mexico. En *Food First Development Report No 10* Oakland, Institute of Food and Development Policy.
- Holt-Giménez E. 2002. Measuring farmers' agroecological resistance after Hurricane Mitch in Nicaragua: A case study in participatory, sustainable land management impact monitoring. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 93: 87-105.
- Horwith B. 1985. A role for intercropping in modern agriculture. *BioScience* 35: 286-291.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC Special Report, WGII.
- Jones PG, Thornton PK. 2003. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change* 13: 51-59.
- Kahn ZR, Ampong-Nyarko K, Hassanali A, Kimani S. 1998. Intercropping increases parasitism of pests. *Nature* 388: 631-632.
- Koohafkan P, Altieri MA. 2010. *Globally important agricultural heritage systems: a legacy for the future*. UN-FAO, Rome
- Kurukulasuriya P, Rosenthal S. 2003. *Climate change and agriculture a review of impacts and adaptations*. Climate Change Series Paper (91), Washington DC, World Bank.
- Landis DA, Gardiner MM, van der Werf W, Swinton SM. 2008. Increasing corn for biofuel production reduces biocontrol services in agricultural landscapes. *PNAS* 105(51): 20552-20557.
- Lin B. 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience* 61: 183-193.
- Lin BB. 2007. Agroforestry management as adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. *Agricultural and Forest Meteorology* 144: 85-94.
- Lobell DB, Field CB. 2007. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters* 2: 1-7.
- Lobell DB, Gourdji SM. 2012. The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiology* 160: 1686-1697.

- Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333: 616–620.
- Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A, Hooper DU, Huston MA, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle DA. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science* 294: 804–808
- Machado S. 2009. Does intercropping have a role in modern agriculture?. *Journal of Soil and Water Conservation* 64: 55–58.
- Magdoff F, Weil R. 2004. Soil organic matter management strategies. En *Soil Organic matter in sustainable agricultura* (Magdoff F, Weil R, eds). Boca Raton: CRC Press, pp 44–65.
- Mapfumo P, Adjei-Nsiah S, Mtambanengweb F, Chikowo R, Giller KE. 2013. Participatory action research (PAR) as an entry point for supporting climate change adaptation by smallholder farmers in Africa. *Environmental Development* 5: 6–22.
- Matthews B, Rivington M, Muhammed S, Newton AC, Hallett PD. 2013. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. *Global Food Security* 2: 24–28.
- Mijatovic D, Van Oudenhovenb F, Eyzaguirreb P, Hodgkins T. 2013. The role of agricultural biodiversity in strengthening resilience to climate change: towards an analytical framework. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(2): 95–107.
- Montalba R, Fonseca F, Garcia M, Vieli L, Altieri M. 2015. Determinación de los niveles de riesgo socioecológico ante sequías en sistemas agrícolas campesinos: Influencia de la diversidad cultural y agrobiodiversidad. *PAPER 100* (4): 607–624.
- Moyer J. 2010. *Organic No-Till Farming*. Emmaus PA: Rodale Press.
- Murgueitio E, Calle Z, Uribea F, Calle A, Solorio B. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management* 261: 1654–1663.
- Nakashima, DJ, Galloway McLean, K, Thulstrup, HD, Ramos Castillo, A, Rubis, JT. 2012. *Weathering Uncertainty: Traditional Knowledge for Climate Change Assessment and Adaptation*. Paris, UNESCO, and Darwin, UNU, 120 pp.
- Natarajan M, Willey RW. 1996. The effects of water stress on yields advantages of intercropping systems. *Field Crops Research* 13: 117–131.
- National Research Council, Committee on Genetic Vulnerability of Major Crops. 1972. *Genetic vulnerability of major crops*. Washington DC, National Academies of Science.
- Netting R, McC. 1993. *Smallholders, Householders: Farm Families and the Ecology of Intensive, Sustainable Agriculture*. Palo Alto, CA: Stanford University Press.
- Nicholls CI, Ríos L, Altieri MA. 2013. *Agroecología y resiliencia socioecológica: adaptándose al cambio climático*. Red Ibero Americana de Agroecología para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático (REDAGRES). Medellín, Colombia.
- Nicholls CI, Altieri MA. 2013. *Agroecología y cambio climático: metodologías para evaluar la resiliencia socioecológica en comunidades rurales*. Red Ibero Americana de Agroecología para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático (REDAGRES). Lima, Peru: Gama GraPerfecto I, Vandermeer J, Wright A. 2009. *Nature's matrix: linking agriculture, conservation and food sovereignty*. London: Earthscan.
- Petersen P, Tardin JM, Marochi F. 1999. Participatory development of no-tillage systems without herbicides for family farming; the experience of the Center-South region of Paraná. En *Environment, development and sustainability*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- Philpott SM, Lin BB, Jha S, Brines SJ. 2009. A multiscale assessment of hurricane impacts on agricultural landscapes based on land use and topographic features. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128: 12–20.
- Pimentel D, Levitan LC. 1986. Pesticides: amounts applied and amounts reaching Pests. *BioScience* 36: 514–515.
- Ponti L, Gutiérrez AP, Ruti PM, Delluila A. 2014. Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 111 (15): 5598–5603.
- Porter JH, Parry ML, Carter TR. 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. *Agricultural and Forest Meteorology* 57(1–3): 221–240.
- Reij C. 1991 *Indigenous Soil and Water Conservation in Africa*. IIED Gatekeeper Series No 27, London.
- Reij C, Scoones I, Toulmin C. 1996. *Sustaining the soil: indigenous soil and water conservation in Africa*. London: Earthscan.
- Robinson RA, Wallace R. 1996. Return to resistance: Breeding crops to reduce pesticide dependence. *Australasian Plant Pathology* 25: 216–217.
- Rodale Institute. 2011. *The farming systems trial: celebrating 30 years*. Pennsylvania: Rodale Press.
- Rogé P, Friedman AR, Astier M, Altieri MA. 2014. Farmer strategies for dealing with climatic variability: a case study from the Mixteca Alta Region of Oaxaca, Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38 (7): 786–811.
- Rosenzweig C, Hillel D. 2008. Climate change and the global harvest: impacts of El Niño and other os-

- cillations on agroecosystems. New York: Oxford University Press.
- Rosset PM, Machín-Sosa B, Roque-Jaime AM, Avila-Lozano DR. 2011. The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba. *Journal of Peasant Studies* 38(1): 161-91.
- Rubenstein DK, Heisey P, Shoemaker R, Sullivan J, Frisvold G. 2005. Crop genetic resources: an economic appraisal. United States Department of Agriculture (USDA). *Econ Information Bulletin* No. 2
- Sutherst RW, Constable F, Finlay KJ, Harrington R, Luck J, Zalucki MP. 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2 (2): 220-237.
- Swiderska K. 2011. The role of traditional knowledge and crop varieties in adaptation to climate change and food security in SW China, Bolivian Andes and coastal Kenya. IIED London.
- Thornton PK. 2003. The potential impacts of climate change in tropical agriculture: the case of maize in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change* 13: 51-59.
- Thrupp LA. 1998. *Cultivating Diversity: Agrobiodiversity and food security*. World Resources Institute. Washington DC
- Toledo VM, Barrera-Bassols N. 2008. *La Memoria Biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales*. Barcelona: ICARIA Editorial.
- Tompkins EL, Adger WN. 2004. Does Adaptive Management of Natural Resources Enhance Resilience to Climate Change. *Ecology and Society* 9(2):10
- Vandermeer J. 1989. *The Ecology of Intercropping*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vandermeer J, van Noordwijk M, Anderson J, Ong C, Perfecto I. 1998. Global change and multi-species agroecosystems: concepts and issues. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 67:1-22.
- Via Campesina. 2010. *Sustainable peasant and small family farm agriculture can feed the world*. Via Campesina Views, Jakarta.
- Vigouroux J. 2011. Biodiversity, evolution and adaptation of cultivated crops. *Comptes Rendus Biologies* 334: 450-457.
- Ward NL, Masters GJ. 2007. Linking climate change and species invasion: an illustration using insect herbivores. *Global Change Biology* 13(8):1605-1615.
- West TD, Griffith DR. 1992. Effect of strip-intercropping corn and soybean on yield and profit. *Journal of Production Agriculture* 5: 107-110.
- Wilken GC. 1987. *Good farmers: traditional agricultural resource management in Mexico and Central America*. Berkeley: University of California Press.
- Zhu Y, Fen, H, Wang Y, Li Y, Chen J, Hu L, Mundt CC. 2000. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature* 406: 718-772.
- Ziska LH, Dukes JS. 2014. *Invasive Species and Global Climate Change*, CABI Invasives Series. Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Zougmore R, Mando A, Stroosnijder L. 2004. Effect of soil and water conservation and nutrient management on the soil-plant water balance in semi-arid Burkina Faso. *Agricultural Water Management* 65:102-120.