

## Sustentabilidad de agroecosistemas de milpa en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca

Martínez Pérez, Dulce Yaneth<sup>1</sup>; Julio, Sánchez Escudero<sup>1</sup>; María de las Nieves, Rodríguez Mendoza<sup>1</sup>; Marta, Astier Calderón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km. 36.5, Montecillo, Texcoco Estado de México, México, C.P. 56230; <sup>2</sup>Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM Campus Morelia. Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. Morelia Michoacán, México. C.P. 58190; [clarijul@hotmail.com](mailto:clarijul@hotmail.com)

Martínez Pérez, Dulce Yaneth; Julio, Sánchez Escudero; María de las Nieves, Rodríguez Mendoza; Marta, Astier Calderón (2020). Sustentabilidad de agroecosistemas de milpa en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-16. <https://doi.org/10.24215/16699513e048>

La milpa, asociación integrada por maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus* spp.) y calabaza (*Cucurbita* spp.), es el sistema de producción de alimentos más importante para el autoabasto de las familias que viven en zonas rurales de México. El objetivo de este estudio fue evaluar la sustentabilidad de agroecosistemas de milpa en una comunidad de la Sierra Norte de Oaxaca. La evaluación se realizó en 12 parcelas de milpa, divididas en dos grupos de contraste por sus prácticas de manejo, y sus respectivas unidades familiares. Con base en la metodología Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) se seleccionaron 15 indicadores de sustentabilidad que se midieron a través de una encuesta, principalmente. Los agroecosistemas se reagruparon mediante un análisis multivariado realizado con la paquetería Rcmdr del software libre R. Los indicadores se transformaron a una escala estandarizada de 0 a 100 mediante el método de intervalo de referencia. El análisis multivariado reclasificó a los agroecosistemas en tres conglomerados, que se diferenciaron principalmente por el indicador relación beneficio-costos neto, y distinguió dos casos atípicos. Los elementos que le dotan de mayor sustentabilidad a los agroecosistemas evaluados son la biodiversidad agrícola y circundante, el contenido de materia orgánica del suelo, y la baja dependencia de insumos químicos y apoyos gubernamentales. No obstante, la sustentabilidad de estos sistemas se ve amenazada por la variabilidad climática y por la incertidumbre del relevo generacional.

**Palabras clave:** indicadores; agricultura campesina; maíz; variabilidad climática; MESMIS.

Martínez Pérez, Dulce Yaneth; Julio, Sánchez Escudero; María de las Nieves, Rodríguez Mendoza; Marta, Astier Calderón (2020). Sustainability of milpa agroecosystems in La Trinidad Ixtlán, Oaxaca. Rev. Fac. Agron. Vol 119 (2): 1-16. <https://doi.org/10.24215/16699513e048>

Milpa is an integrated agricultural system where maize (*Zea mays* L.), bean (*Phaseolus* spp.), and pumpkin (*Cucurbita* spp.) are associated; is the most crucial system of food for self-consumption for rural families in México. The objective of this study was to evaluate sustainability in milpa agroecosystems in one rural community of Sierra Norte of Oaxaca. The study was conducted in 12 milpa parcels, which were divided in two different groups given their management practices, and their respective family units. Based on the methodology for evaluating natural resource management systems incorporating indicators of sustainability (MESMIS), 15 sustainability indicators were measured through a survey application. Agroecosystems were regrouped through a multivariate analysis using a Rcmdr program from the free software R. Indicators were converted to a normalized scale from 0 to 100 through the reference interval method. Multivariate analysis reclassified agroecosystems in three conglomerates, which were mainly differentiated by the cost-benefit indicator, and distinguished two atypical cases. Sustainability reaches agroecosystems thanks to higher values of biodiversity and soil organic matter indicators and lower values of chemical inputs and governmental dependency indicators. Nevertheless, in these agroecosystems, sustainability is threatened because of climatic variability and generation succession uncertainty.

**Key words:** indicators; peasant agriculture; maize; climate variability; MESMIS

<https://revistas.unlp.edu.ar/revagro>

Recibido: 28/07/2019

Aceptado: 20/02/2020

Disponible on line: 07/12/2020

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina



## INTRODUCCIÓN

En México, el sistema de producción de milpa, conformado por la asociación de maíz (*Zea mays* L.), frijol (*Phaseolus* spp.) y calabaza (*Cucurbita* spp.), se constituye como una de las más antiguas estrategias tradicionales de producción de cultivos y de autoabasto de alimentos, que es practicada, principalmente, en temporada de lluvias por pequeños productores indígenas y campesinos (Aguilar et al., 2003; García-Martínez et al., 2016). Estos cultivos forman la asociación básica de la milpa, que generalmente se acompañan de otras plantas comestibles, medicinales y forrajeras que se establecen de acuerdo con las condiciones biofísicas de cada lugar y las costumbres alimenticias de los productores (Linares & Bye, 2011; Benítez et al., 2014; Molina-Anzures et al., 2016; Ebel et al., 2017).

Algunas ventajas que proporciona la diversidad de especies y variedades que se cultivan en la milpa son: el mantenimiento de la productividad a largo plazo, la reducción del riesgo de pérdida de cosecha frente a plagas, enfermedades o eventos climáticos, y la diversificación de la dieta alimentaria (Altieri & Toledo, 2011; Benítez et al., 2014). La milpa también puede presentar frutales, arreglo que otorga otros beneficios ambientales y económicos a las familias campesinas como provisión de alimentos variados, ingresos por la venta de excedentes de fruta, protección del suelo contra la erosión e incremento de la captura de carbono atmosférico (Molina-Anzures et al., 2016; Turrent et al., 2017).

El cultivo de milpa está mediado por la racionalidad campesina, que opera de manera distinta al modelo de agricultura convencional (Landini, 2011). Su objetivo es la producción de alimentos para el autoabasto familiar, comunitario y regional, y se concibe como un modo de vida, una garantía de alimentos sanos y una estrategia para asegurar su reproducción social (Isakson, 2009; Altieri et al., 2012; Montes, 2016). La alta demanda de trabajo que requiere el cultivo de milpa se cubre regularmente con mano de obra familiar, estrategia que permite aminorar los costos monetarios de producción (Isakson, 2009; Magdaleno-Hernández et al., 2014; Molina-Anzures et al., 2016).

La sustentabilidad agrícola se define como la capacidad para mantener una producción estable a lo largo del tiempo sin perjudicar la base de recursos naturales de los que depende y el medio ambiente que lo rodea (Pretty, 2008; Koohafkan et al., 2012; Weiner, 2017). Esta definición supone el cumplimiento de criterios como la existencia de procesos biológicos y ecológicos que promuevan una autorregulación del agroecosistema (Pretty, 2008), el mínimo uso de insumos contaminantes y energías no renovables, la viabilidad económica de la producción (Altieri et al., 2012), y la capacidad adaptativa y resiliente del agroecosistema para mantener su productividad ante disturbios y cambios socioambientales (Koohafkan et al., 2012; Caporali, 2015). En este contexto resaltan la diversificación del agroecosistema y el mantenimiento de la calidad del suelo como dos principios

fundamentales de la sustentabilidad propuestos por la agroecología (Gliessman et al., 2007; Sánchez De P et al., 2012; Nicholls et al., 2015).

Por lo anterior, la agroecología reconoce al sistema milpa como un modelo de sustentabilidad agrícola debido a que sus características intrínsecas le han permitido ser productiva, eficiente y resiliente en el tiempo (Altieri et al., 2012). No obstante la potencialidad de este sistema tradicional de cultivo, debido a las políticas agrícolas neoliberales implementadas en el país durante la revolución verde y a los procesos sociales como la migración campo-ciudad, la milpa ha venido enfrentando diferentes problemas que desestabilizan este sistema (Eakin et al., 2014; Rodríguez & Arias, 2014; Gil & Vivar, 2015; Donatti et al., 2018; Ebel et al., 2018).

En la Sierra Norte del estado de Oaxaca, la actividad agropecuaria, y, particularmente, el cultivo de la milpa, se ha debilitado a causa del proceso nacional de crisis agrícola, reformas sectoriales y de la interrelación de factores locales como la migración, la apertura comercial, la disminución de las prácticas colectivas para el trabajo agrícola y el inicio de la actividad forestal comunitaria (De la Tejera & García, 2008). Ante esta situación, el presente estudio tuvo por objetivo documentar y evidenciar que factores influyen en la sustentabilidad del agroecosistema milpa en La Trinidad Ixtlán Oaxaca, comunidad perteneciente a la citada región, bajo la hipótesis de que existen elementos ambientales y socioeconómicos que promueven y afectan la capacidad de este sistema para mantenerse en el tiempo.

Los resultados de este trabajo pueden contribuir a la implementación de estrategias localmente adecuadas para el mantenimiento y mejora del sistema milpa, y con ello conservar la principal estrategia de autoabasto de las unidades familiares que la practican.

## METODOLOGÍA

La evaluación se abordó desde el enfoque de la agroecología y se consideró al agroecosistema como un sistema socioecológico integrado por la parcela donde se siembra la milpa y la unidad familiar que lo maneja. Durante el estudio se promovió la investigación participativa, metodología que integra a los campesinos en el proceso de indagación y análisis de su problemática particular, así como en la búsqueda de soluciones (Guzmán & Alonso, 2007).

### Área de estudio

La Trinidad Ixtlán, es una agencia perteneciente al municipio de Santiago Xiacuí, distrito de Ixtlán de Juárez, de la región Sierra Norte del estado de Oaxaca. Se localiza aproximadamente a 69 km al noroeste de la ciudad capital Oaxaca de Juárez, entre los 17°15' y 17°17' N y los 96°21' y 96°25' O, y en un rango altitudinal de 2000 a 2950 m (Figura 1). Su territorio abarca una superficie de 805 ha de propiedad comunal y 496 ha de pequeñas propiedades (UZACHI, 2014).

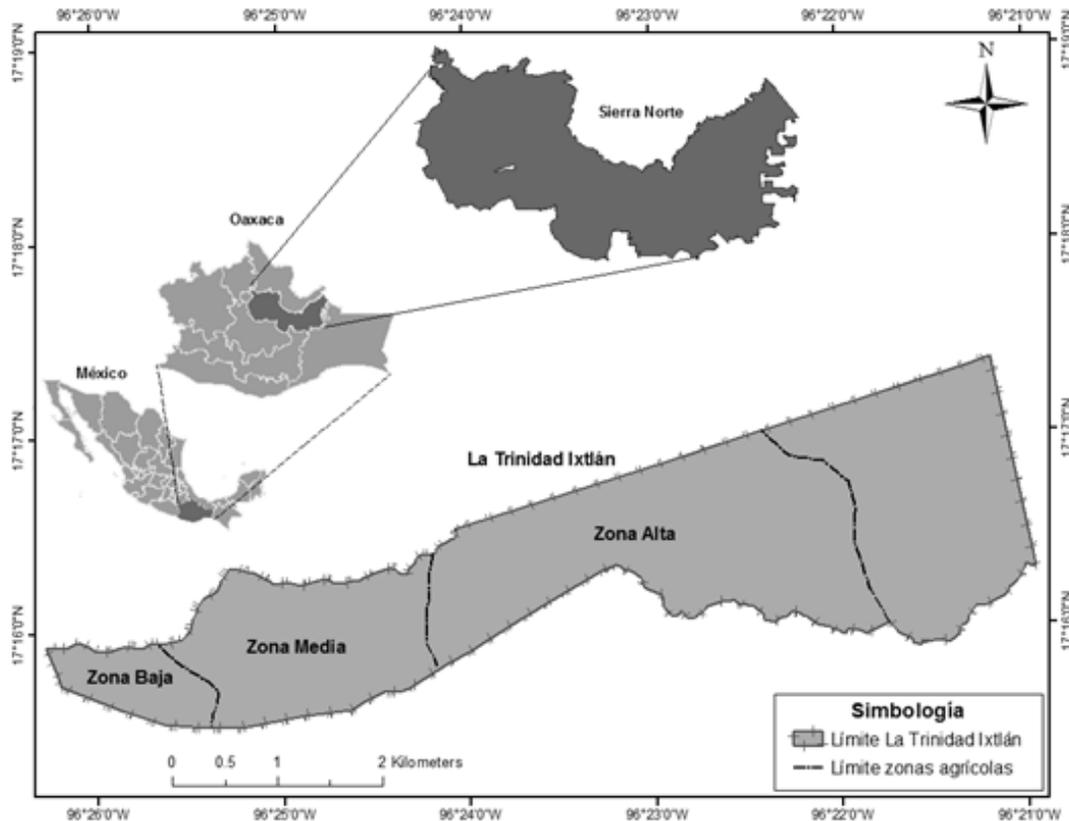


Figura 1. Localización geográfica de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca.

Los suelos presentes en la zona son el acrisol y luvisol (INEGI, 2005). Los tipos de clima reportados para La Trinidad Ixtlán son templado húmedo C(m)(w) y templado subhúmedo C(w2)(w) (INEGI, 2008). La temperatura media anual en la zona es de 17.2 °C. La temporada más fría del año abarca de noviembre a enero, mientras que los meses más calurosos son marzo, abril y mayo. La precipitación normal anual es de 1015 mm, y los meses de junio a octubre son los más lluviosos (CONAGUA-SMN, 2019). La comunidad se encuentra ubicada en una zona montañosa; debido a esta característica la mayoría de los terrenos donde se practica la agricultura tienen condiciones de ladera, con pendientes de hasta 70 %. En la comunidad existen tres zonas agrícolas, alta, media y baja (Figura 1), diferenciadas por su rango altitudinal y microclima, sin embargo, es en la zona media donde se concentra la mayor actividad y donde se llevó a cabo el estudio.

#### Evaluación de la sustentabilidad

La evaluación de sustentabilidad se realizó con base en el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS), desarrollado por Masera et al. (1999). El estudio se abordó desde el enfoque de la

agroecología, por lo que se promovió la investigación participativa a través de la observación participante y de instrumentos como talleres con campesinos, entrevistas, transectos y visitas a las parcelas. Esto es importante, porque la participación de los campesinos, quienes tienen una percepción integral del agroecosistema milpa, junto con el uso de la herramienta MESMIS es una estrategia que permite la comprensión holística del sistema que se estudia (Guzmán & Alonso, 2007).

#### Agroecosistemas de estudio

Dado que desde la agroecología diferentes autores consideran a la biodiversidad y la calidad del suelo como pilares de la sustentabilidad de un agroecosistema (Gliessman et al., 2007; Koohafkan & Altieri, 2011; Sánchez De P et al., 2012; Nicholls et al., 2015), se eligieron seis parcelas donde estuvieran presentes prácticas de manejo enfocadas a la conservación del suelo y diversificación de cultivos, y otras seis cercanas, pero sin la presencia de estas prácticas. Cada una de las parcelas se consideró como un agroecosistema (A), entendiendo a este como un sistema socioecológico integrado por la parcela y la unidad familiar campesina que la maneja (Caporali, 2015).

La caracterización socioambiental de los agroecosistemas se realizó con base en los recorridos de campo y los datos obtenidos en una encuesta.

### Selección y medición de los indicadores

El MESMIS propone la derivación de indicadores con base en puntos críticos, los cuales son elementos o procesos que limitan o fortalecen la capacidad de los agroecosistemas para sostenerse en el tiempo, y pueden ser de tipo ambiental, técnico, social o económico (Mäser et al., 2008). Estos se identificaron con base en la entrevista con las autoridades municipales y comunales de la comunidad, la realización de un taller participativo con campesinos y recorridos por las parcelas (Arnés et al., 2018).

Una vez definidos los puntos críticos, se derivaron 15 indicadores de sustentabilidad distribuidos en los cinco atributos propuestos por el MESMIS. En la Tabla 1, se resumen los indicadores utilizados así como su forma y escala de medición. Estratégicamente, a lo largo de la investigación se realizaron tres talleres más con campesinos de los agroecosistemas de estudio y de la comunidad en general, que tuvieron por objetivo validar los indicadores, establecer sus valores de referencia y profundizar en su análisis.

### Análisis e integración de los resultados

Al principio se consideró realizar el análisis de sustentabilidad contrastando los dos grupos de agroecosistemas: con prácticas de manejo para la conservación del suelo y diversificación de cultivos (A1-A6) y sin estas prácticas (A7-A12). Sin embargo, al revisar los resultados se detectó una gran variabilidad dentro de los grupos, situación que dificultaba el análisis, por lo que se decidió utilizar la estadística multivariada con el objetivo de reagrupar a los agroecosistemas según su similitud en los resultados de los indicadores. Los métodos utilizados fueron el análisis de componentes principales (ACP) y el análisis clúster. Ambas pruebas se realizaron de manera consecutiva con la paquetería Rcmdr del software libre R (Fox & Bouchet-Valat, 2019). Del total de indicadores, en el ACP solo se evaluaron los siete que tuvieron correlaciones significativas ( $\alpha = 0.05$ ) según los test de Pearson y Spearman. Estos fueron: rendimiento de maíz, relación beneficio costo neta, autosuficiencia de maíz, dependencia de insumos externos, jornales cubiertos con mano de obra familiar, agrobiodiversidad y autosuficiencia de productos básicos.

Para realizar el análisis comparativo de la sustentabilidad, todos los indicadores se transformaron a una escala estandarizada de 0 a 100 mediante el método de intervalo de referencia (Galván-Miyoshi, 2008). Con estos valores estandarizados se elaboró una matriz multicriterio, que muestra los resultados para cada uno de los agroecosistemas, y un diagrama de amiba donde se observa gráficamente el comportamiento de los indicadores según la clasificación del análisis clúster.

## RESULTADOS

### Puntos críticos

Se identificaron cuatro puntos críticos positivos: conservación del sistema milpa, muy baja o nula aplicación de insumos para el control de plagas y enfermedades, presencia de árboles y especies frutales dentro y a los alrededores de las parcelas, y presencia de prácticas para la conservación del suelo. Sin embargo, los dos últimos no aplican para todos los agroecosistemas evaluados.

Los puntos críticos negativos detectados fueron once: daño en cultivos y granos por plagas, pérdida de la fertilidad del suelo, decremento de los rendimientos, pérdida de la autosuficiencia familiar, altos costos de producción y baja rentabilidad, dependencia en fertilizantes químicos, inestabilidad de las cosechas debido a las variaciones del clima, desinterés de las generaciones jóvenes, dificultad para conseguir mano de obra, menor participación de los integrantes de la familia en el trabajo de la parcela, y poco apoyo del gobierno.

### Clasificación y características de los agroecosistemas

Derivado del análisis de componentes principales se generó un análisis clúster, a partir de las variables del primer y segundo componente que explicaron 70 % de la variabilidad total. Los agroecosistemas se clasificaron en tres conglomerados, que se diferenciaron principalmente por los resultados obtenidos en el indicador relación beneficio-costo: El Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo (CABC), el Conglomerado de Media relación Beneficio Costo (CMBC) y el Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo (CBBC). Los tres conglomerados agruparon 10 agroecosistemas (A1, A3, A4, A6 – A12), mientras que los dos restantes, agroecosistema 2 (A2) y agroecosistema 5 (A5), se trataron como estudios de caso porque representan casos atípicos en el indicador rendimiento de maíz (Figura 2).

Las características biofísicas, de manejo y socioeconómicas de los conglomerados y estudios de caso se resumen en la Tabla 2. Estos sistemas se ubican dentro de la zona agrícola media, en un rango altitudinal de 2250 - 2500 m. Las parcelas agrícolas tienen pendientes que varían entre 10 y 50 %, y un área promedio de 0.8 ha, sin embargo, las familias campesinas solo cultivan entre 10 y 33 % de su superficie.

En los agroecosistemas A2 y A5, la milpa se siembra intercalada con árboles frutales. En ambos casos, se presentan cerca de 90 árboles de frutas. Debido a tal característica, en estos agroecosistemas solo se utilizan herramientas manuales para la preparación del terreno y la siembra, mientras que en el resto se puede utilizar yunta.

Tabla 1. Indicadores derivados para la evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas de milpa en La Trinidad

Atributo	Criterio de diagnóstico	Indicador	Forma de medición	Escala
Productividad	Retornos	Rendimiento de maíz	Encuesta y estimación en campo	Parcela
		Autosuficiencia de maíz	Encuesta	Parcela
	Eficiencia	Costos de producción	Encuesta	Parcela
		Relación beneficio-costo neta	Encuesta	Parcela
		Autosuficiencia de productos básicos	Encuesta	Parcela
Estabilidad, confiabilidad y resiliencia	Conservación de los recursos	Agrobiodiversidad	Encuesta	Parcela
		Diversidad circundante	Observación en campo	Parcela
		Materia orgánica del suelo	Laboratorio	Parcela
	Fragilidad del sistema	Afectación de cultivos por plagas y enfermedades	Encuesta	Parcela
		Merma en la producción de maíz por eventos climáticos	Estimación	Parcela
Adaptabilidad	Capacidad de cambio e innovación	Capacidad de adaptación a las variaciones del clima	Encuesta	Unidad familiar
	Organización social	Jornales cubiertos con mano de obra familiar	Encuesta	Parcela
Equidad	Distribución de los costos y el trabajo	Relevo generacional	Encuesta	Parcela
Autogestión	Recursos externos	Dependencia de insumos externos	Encuesta	Parcela
		Dependencia de apoyos gubernamentales	Encuesta	Parcela

En todos los sistemas se aplican fertilizantes nitrogenados y solo en el CABC también se suministran fertilizantes fosfatados. El control de las arvenses se realiza con herramientas manuales, y no existen acciones de control para plagas y enfermedades.

El objetivo principal de los agroecosistemas de milpa es el autoabasto familiar, no obstante, la mayoría de las familias campesinas (75 %) venden excedentes de ciertos productos a nivel local y regional. El trabajo de la parcela se cubre con mano de obra familiar y jornales contratados en la misma comunidad. La edad de los campesinos y campesinas jefes de familia, que son quienes realizan o coordinan las actividades agrícolas, se encuentra entre 44 y 86 años.

#### Indicadores de sustentabilidad

En la Tabla 3 se resumen los datos obtenidos para los indicadores de sustentabilidad, así como sus valores de referencia. En este se omiten el relevo generacional y la dependencia de apoyos gubernamentales, dado que no se analizaron según la clasificación de conglomerados.

**Rendimiento de maíz.** De acuerdo con lo reportado por los campesinos para años de buena producción, cuando no se presentan eventos climáticos adversos, los agroecosistemas del CABC y el A5 son los que obtienen los rendimientos de maíz más altos (5327 y 4426 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). El CBBC y el CMBC obtienen rendimientos cercanos a los 3000 kg ha<sup>-1</sup> pero no alcanzan el valor óptimo. Por su parte, el A2 es el agroecosistema que obtiene el rendimiento más bajo debido a que, por ubicarse cerca de una zona boscosa, los animales silvestres ocasionan daños en el cultivo de maíz.

**Autosuficiencia de maíz.** A pesar de que se encontró una alta correlación entre la autosuficiencia de maíz y el rendimiento de grano ( $r = 0.7305$ ,  $p\text{-value} = 0.0069$ ), y que los rendimientos obtenidos superan la cantidad de maíz necesaria para la alimentación anual de una familia de cuatro integrantes (450 kg), se observa que solo el CABC y el A5 alcanzan a cubrir la autosuficiencia de maíz anual.

Esto se debe a que la producción real obtenida se encuentra en el rango de 100 a 1100 kg ciclo<sup>-1</sup> dado que se cultivan superficies menores a una hectárea (entre 800 y 2600 m<sup>2</sup>).

**Costos de producción – Jornales cubiertos con mano de obra familiar.** Todos los conglomerados y los estudios de caso tienen elevados costos de producción, por arriba de \$ 29 000.00 ha<sup>-1</sup>, debido a la cantidad de jornales demandados para las labores agrícolas (Tabla 4). No obstante, gran parte de los trabajos son realizados por integrantes de la familia, lo que permite, en la mayoría de los casos, disminuir los costos en más de 35 %.

**Relación beneficio costo neta.** Aunque el CABC tiene los costos de producción más altos, porque en esos agroecosistemas utilizan mayor cantidad de fertilizantes, su relación beneficio costo neta es mayor que 2.0 dado que 95 % de los jornales se cubren con mano de obra familiar.

Por el contrario, el CBBC no supera la unidad, dado que el trabajo familiar solo representa 17 % de los jornales (Tabla 4). El A5 es el agroecosistema que tuvo mejor ponderación respecto a este indicador.

Esto se debe a su alto rendimiento y menor costo total, lo que permite obtener un coeficiente mayor que uno aun cuando todos los jornales fueran contratados. En contraste, aunque el A2 tiene los costos netos más bajos, porque todos los jornales se cubren con mano de obra familiar, este no alcanza el coeficiente óptimo debido al bajo rendimiento de maíz (Tabla 4).

**Agrobiodiversidad.** Tanto los conglomerados como los estudios de caso obtuvieron un valor óptimo. Todos presentaron nueve o más especies y variedades agrícolas, dentro de las cuales destacan el maíz (*Zea mays* L.), el frijol (*Phaseolus vulgaris* L. y *P. coccineus* L.), la calabaza (*Cucurbita pepo* L.), la chilacayota (*C. ficifolia* B.), el haba (*Vicia faba* L.) y dos especies de hierbas comestibles o también llamadas quelites (*Amaranthus hybridus* L. y *Brassica rapa* L.).

Los cultivos menos comunes son el trigo (*Triticum aestivum* L.), el chícharo (*Pisum sativum* L.) y los árboles frutales. Los agroecosistemas A2 y A5 son los que presentan una mayor agrobiodiversidad (17 y 39 especies y variedades agrícolas, respectivamente) dado que la milpa se siembra intercalada con árboles frutales.

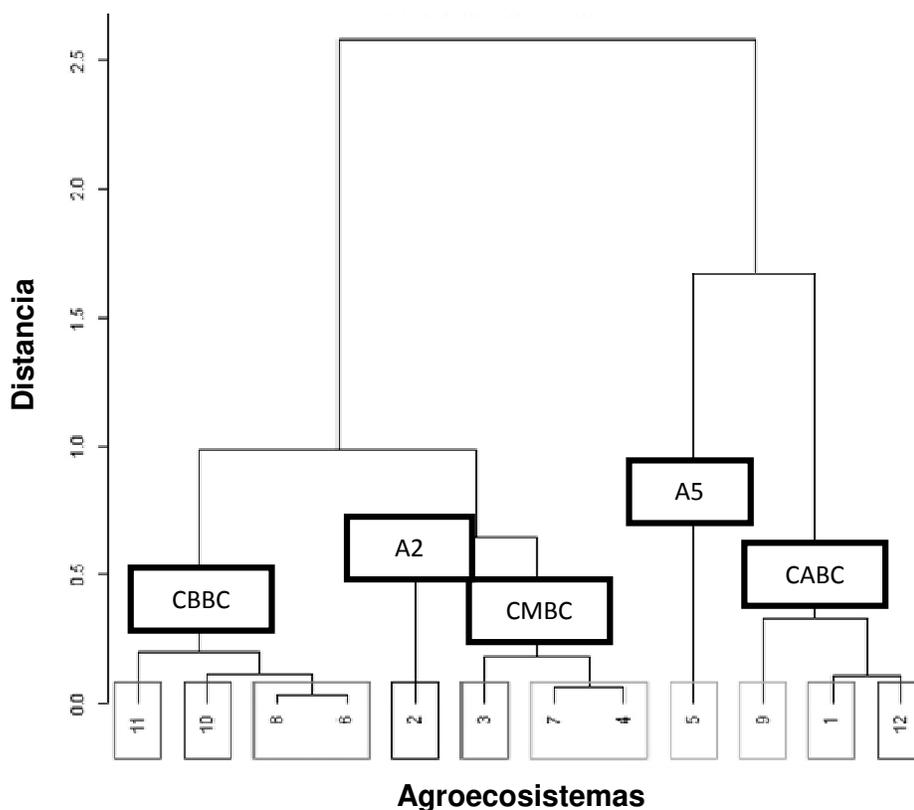


Figura 2. Dendrograma generado en el análisis clúster para el agrupamiento de los agroecosistemas de estudio en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca. CABC: Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo. CMBC: Conglomerado de Media relación Beneficio Costo. CBBC: Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo. A2: Agroecosistema 2. A5: Agroecosistema 5.

Tabla 2. Características biofísicas, de manejo y socioeconómicas de los agroecosistemas de estudio en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca. CABC: Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo. CMBC: Conglomerado de Media relación Beneficio Costo. CBBC: Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo. A2: Agroecosistema 2. A5: Agroecosistema 5. Característica biofísicas: Clima: templado subhúmedo C(w2)(w); Temperatura media anual: 17,2 °C; Precipitación anual: 1014 mm; Altitud: 2250 – 2500 m; Pendiente de parcelas: 10 – 50 %.

Variables	CABC	CMBC	CBBC	A2	A5
Superficie cultivada (m <sup>2</sup> )	900-2600	1100-1800	800-1600	1200	1600
<b>Manejo</b>					
Especies y variedades agrícola	Milpa (maíz, frijol, calabaza, chilacayote, haba y quelites). Algunas parcelas cuentan con árboles frutales y realizan rotación del cultivo con chícharo.			Milpa intercalada con árboles frutales. Chícharo	Milpa intercalada con árboles frutales.
Tecnología para la preparación del terreno y siembra	Herramientas manuales, yunta o su combinación.			Herramientas manuales	
Fertilizantes químicos	161-111-0	41-0-0	78-0-0	44-0-0	67-0-0
N, P, K (kg ha <sup>-1</sup> )					
Control de arvenses	Herramientas manuales				
Control de plagas y enfermedades	Ninguna				
<b>Socioeconómicas</b>					
Destino de la producción	Autoconsumo familiar.	Autoconsumo familiar. Venta local de frutas y productos de la milpa.		Autoconsumo familiar. Venta local de frutas y productos de la milpa	Autoconsumo familiar. Venta local de frutas
Mano de obra predominante	Familiar	Familiar	Contratada	Familiar	Contratada
Edad de jefes (as) de familia (años)	44-55	78-86	56-69	77	55

**Autosuficiencia de productos básicos.** La diversidad agrícola promueve la autosuficiencia de otros productos básicos para la alimentación familiar (Rho = 0.8879, p-value = 0.0001), mismos que están disponibles en diferentes momentos del año. La ventaja es mayor para las familias del A2 y el A5, quienes pueden obtener de su parcela 70 y 83 % de un total de 23 productos agrícolas comúnmente consumidos.

**Diversidad circundante.** Al respecto de la diversidad vegetal no agrícola, se encontró que alrededor de las parcelas se presentan tres grupos vegetales perennes: setos y arbustos, árboles y plantas con flores. El A2 y A5 presentan los tres grupos, mientras que los conglomerados únicamente dos, con un predominio de árboles y, setos y arbustos.

**Afectación de cultivos por plagas y enfermedades.** Todos los campesinos mencionaron tener mínimas o nulas pérdidas a causa de las mismas, aun cuando en la mayoría de los agroecosistemas (66 %) se reportó su presencia. Las plagas más comunes reportadas por los campesinos fueron: gusano cogollero (*Spodoptera*

*Frugiperda* Smith), picudo del maíz (*Nicentrites testaceipes* Champion), gallina ciega (*Phyllophaga* sp.) y pulgón del haba (*Aphis fabae* Scopoli). Para el caso de los frutales, se reportaron insectos y enfermedades no identificadas que afectan al tronco y los frutos de manzana (*Pyrus malus* L.), durazno (*Prunus persica* [L.] Batsch) tejocote (*Crataegus mexicana* Moc. & Sessé) y membrillo (*Amelanchier denticulata* [Kunth] Koch).

**Materia orgánica.** Los niveles encontrados, en general fueron altos para todos los agroecosistemas, aunque dos conglomerados no alcanzaron el valor óptimo. El CABC obtuvo el valor más bajo (2,97 %) seguido por el CMBC (3,41 %) y el CBBC (3,62 %). El A2 y A5 obtuvieron los valores más altos (3,74 y 5,93 %, respectivamente), lo que se cree puede ser debido al mayor aporte de biomasa por parte de los árboles frutales que presentan. Los resultados de la investigación demuestran que los niveles de materia orgánica no están correlacionados con la pendiente de las parcelas (Rho = -0.3985, p-value = 0.1993) ni con los años de trabajo de la misma (Rho = 0.1837, p-value = 0.5676).

**Merma de la producción de maíz por eventos climáticos.** En la región de estudio, durante el ciclo de producción 2018 la precipitación en los meses de junio a septiembre, en especial durante el mes de julio, fue menor a la media, mientras que las temperaturas mínimas fueron superiores al promedio (Figura 3). Ambas situaciones provocaron la merma de más de 50 % en la producción de maíz. Las pérdidas fueron altas para todos los agroecosistemas, pero se observó que el CABC fue el más afectado al perder casi 95 % de la producción de este grano.

En el CMBC, A2 y A5, la merma fue cercana al 75 % de la producción, mientras que el CBBC fue el que tuvo una menor pérdida (56 %). La sequía fue el evento climático que ocasionó daños en todos los agroecosistemas, no obstante, tanto el A2 como el A5 reportaron afectaciones a causa de las lluvias extremas que se presentaron en el mes de octubre (Figura 3). Estas provocaron el acame y el consecuente daño en la mazorca, por pudrición y por animales silvestres.

**Capacidad de adaptación a las variaciones del clima.** Este indicador se evaluó a escala de unidad familiar, mediante el número de prácticas implementadas como estrategias de adaptación ante la variabilidad climática. En total, se documentaron cuatro prácticas: cambio de las fechas de siembra, riego de auxilio, siembra de milpa en más de una parcela y siembra en más de un microclima. Sin embargo, en la mayoría de los sistemas solo se presenta una (Tabla 3). El CBBC y el A2 son los que presentaron un mayor número de estrategias (2 y 3, respectivamente).

**Relevo generacional.** En este indicador, siete de los 12 agroecosistemas evaluados tuvieron un valor crítico (Figura 4), debido a que el relevo generacional es incierto. Esto se debe a que los miembros de la familia menores de 30 años se encuentran estudiando o se espera que lo hagan, lo que significa que en el futuro emigrarán de la comunidad y no continuarán con la práctica agrícola.

Tabla 3. Valores de los indicadores de sustentabilidad evaluados en agroecosistemas de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca, 2018. CABC: Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo. CMBC: Conglomerado de Media relación Beneficio Costo. CBBC: Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo. A2: Agroecosistema 2. A5: Agroecosistema 5. † Indicadores para los cuales se presenta el valor de la moda en los conglomerados. N: nada; MP: muy poco

Indicadores (unidades)	CABC	CMBC	CBBC	A2	A5	Valor crítico	Valor óptimo	Criterio para el valor óptimo
Rendimiento de maíz (kg ha <sup>-1</sup> )	4426	2877	3141	503	5327	0	3500	Máximo reportado en taller
Autosuficiencia de maíz (meses)	20	10	10	2	22	0	12	Autosuficiencia familiar por un año
Costos de producción (\$ ha <sup>-1</sup> )	42395	29905	33938	35876	29169	32000	16000	Mínimo encontrado
Relación beneficio-costo neta	2,3	1,8	0,7	0,5	2,0	0	1,0	Sin pérdidas monetarias
Autosuficiencia de productos básicos (%)	36	46	35	70	83	0	100	Abasto de los productos agrícolas consumidos
Agrobiodiversidad (# especies y variedades agrícolas)	9	12	9	17	39	1	9	Milpa diversificada (6 cultivos y al menos tres con dos variedades)
Diversidad circundante (# de grupos vegetales) †	2	2	2	3	3	0	3	Total de grupos vegetales identificados
Materia orgánica (%)	2,97	3,41	3,62	3,74	5,93	0	3,5	Nivel alto para suelos de zonas templadas (Castellanos et al., 2000)
Afectación de cultivos por plagas y enfermedades †	N	N	MP	MP	MP	Casi todo/todo	N/MP	Mínima o nula pérdida
Merma de la producción de maíz por eventos climáticos (%)	94	73	56	75	76	100	0	Nula pérdida
Capacidad de adaptación a las variaciones del clima (# de estrategias) †	1	1	2	3	1	0	4	Máximo de estrategias documentadas
Jornales cubiertos con mano de obra familiar (%)	95	72	17	100	46	0	100	Total de jornales
Dependencia de insumos externos (%)	12	3	5	3	6	20	0	Nula dependencia

En tres de los agroecosistemas el relevo generacional es probable y en dos, muy probable, dado que al menos uno de los integrantes de la familia

menores de 30 años participa en alguna o en todas las actividades agrícolas y no se encuentra estudiando.

Tabla 4. Cálculo de los indicadores costos de producción y relación beneficio-costo para los agroecosistemas de estudio en La Trinidad Ixtlán, Oaxaca, 2018. CABC: Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo. CMBC: Conglomerado de Media relación Beneficio Costo. CBBC: Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo. A2: Agroecosistema 2. A5: Agroecosistema 5.

Entradas (unidades)	Costo unitario (\$ unidad entrada <sup>-1</sup> )	CABC		CMBC		CBBC		A2		A5	
		Entradas (unidades ha <sup>-1</sup> )	Costos (\$ ha <sup>-1</sup> )	Entradas (unidades ha <sup>-1</sup> )	Costos (\$ ha <sup>-1</sup> )	Entradas (unidades ha <sup>-1</sup> )	Costos (\$ ha <sup>-1</sup> )	Entradas (unidades ha <sup>-1</sup> )	Costos (\$ ha <sup>-1</sup> )	Entradas (unidades ha <sup>-1</sup> )	Costos (\$ ha <sup>-1</sup> )
Mano de obra (# jornales)	180	194	34848	138	24863	127	22880	193	34702	152	27394
Familiar	30	194	5808	123	3688	27	809	193	5784	70	2093
Contratada	180	0	0	15	2736	100	18029	0	0	82	14838
Tracción animal (# yuntas)	380	6	2408	11	4044	25	9336	0	0	0	0
Fertilizantes (kg)											
Sulfato de amonio	6	351	1967	169	947	189	1058	210	1174	317	1776
Urea	8	94	753	6	51	83	665	0	0	0	0
Fosfato diamónico	10	242	2419	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Costo total (\$ ha<sup>-1</sup>)</b>			<b>42395</b>		<b>29905</b>		<b>33938</b>		<b>35876</b>		<b>29169</b>
<b>Costo neto (\$ ha<sup>-1</sup>)</b>			<b>13356</b>		<b>11466</b>		<b>29896</b>		<b>6957</b>		<b>18706</b>
Salidas (unidades)	Precio unitario (\$ unidad de salida <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Beneficios (\$ ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Beneficios (\$ ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Beneficios (\$ ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Beneficios (\$ ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Beneficios (\$ ha <sup>-1</sup> )
Maíz grano (kg)	7	4426	30983	2877	20138	3141	21988	503	3521	5327	37286
Rastrojo de maíz (producción total)	150		150		150		150		150		150
<b>Ingreso total (\$ ha<sup>-1</sup>)</b>			<b>31133</b>		<b>20288</b>		<b>22138</b>		<b>3671</b>		<b>37436</b>
<b>Relación beneficio-costo total</b>			<b>0.73</b>		<b>0.68</b>		<b>0.65</b>		<b>0.10</b>		<b>1.28</b>
<b>Relación beneficio-costo neta</b>			<b>2.33</b>		<b>1.77</b>		<b>0.74</b>		<b>0.53</b>		<b>2.00</b>

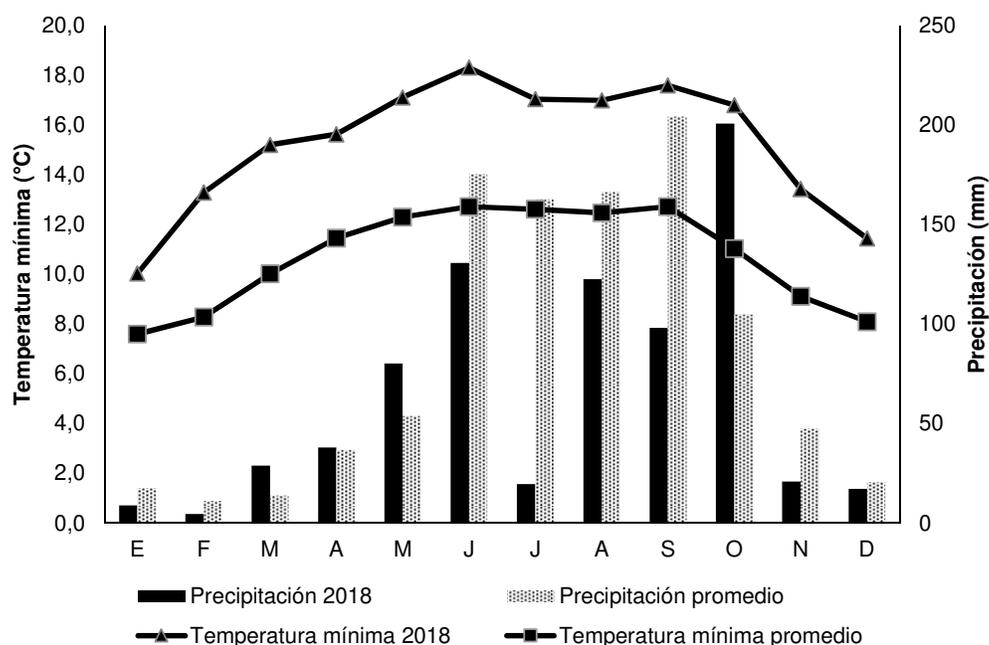


Figura 3. Estadísticas de precipitación y temperatura promedio mensual en el periodo 1956-2018 comparadas con los valores del año 2018 para la región de estudio. Fuente: IRI, 2018; CONAGUA-SMN, 2019; IRI, 2019.

Indicadores	Agroecosistemas										
	CABC			CMBC			CBBC			A2	A5
	A1	A9	A12	A3	A4	A7	A6	A8	A10		
Rendimiento de maíz	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Autosuficiencia de maíz	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Costos de producción	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Relación beneficio-costo neta	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Autosuficiencia de productos básicos	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Agrobiodiversidad	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Diversidad circundante	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Materia orgánica	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Afectación de cultivos por plagas y enfermedades	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Merma en la producción de maíz por eventos climáticos	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Capacidad de adaptación a las variaciones del clima	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Jornales cubiertos con mano de obra familiar	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Relevo generacional	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Dependencia de insumos externos	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
Dependencia de apoyos gubernamentales	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo

Crítico (0-25)
  Bajo (26-50)
  Medio (51-75)
  Alto (76-99)
  Óptimo (100)

Figura 4. Matriz multicriterio de los indicadores de sustentabilidad evaluados en agroecosistemas de milpa de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca, 2018. Los niveles de sustentabilidad se expresan con base en la escala estandarizada de 0 – 100.

**Dependencia de insumos externos.** Los fertilizantes químicos son el único insumo utilizado y, en general, la dependencia de estos es baja para todos los sistemas evaluados. Solo los agroecosistemas del CABC tienen mayor dependencia en estos insumos, dado que su compra representa, en promedio, 12 % de los costos de producción, mientras que, en el CMBC, CBBC, A2 y A5 el porcentaje varía entre 3 y 6 % del total.

**Dependencia de apoyos gubernamentales.** Solo cinco de los 12 campesinos y campesinas jefes de familia de los agroecosistemas evaluados cuentan con el apoyo gubernamental ProAgro Productivo,

antes PROCAMPO (Programa de Apoyos Directos al Campo) (Figura 4). Sin embargo, el apoyo económico solo cubre entre el 14 y 35 % de los costos totales de producción.

A continuación, se muestran los diagramas de amiba donde se integran los indicadores de sustentabilidad evaluados en los conglomerados (Figura 5) y los estudios de caso (Figura 6). Debido a que todos los indicadores se presentan en una escala estandarizada de 0 a 100, donde el valor máximo representa la condición ideal de sustentabilidad, se puede observar gráficamente aquellos indicadores que afectan o promueven la sustentabilidad de los agroecosistemas evaluados.

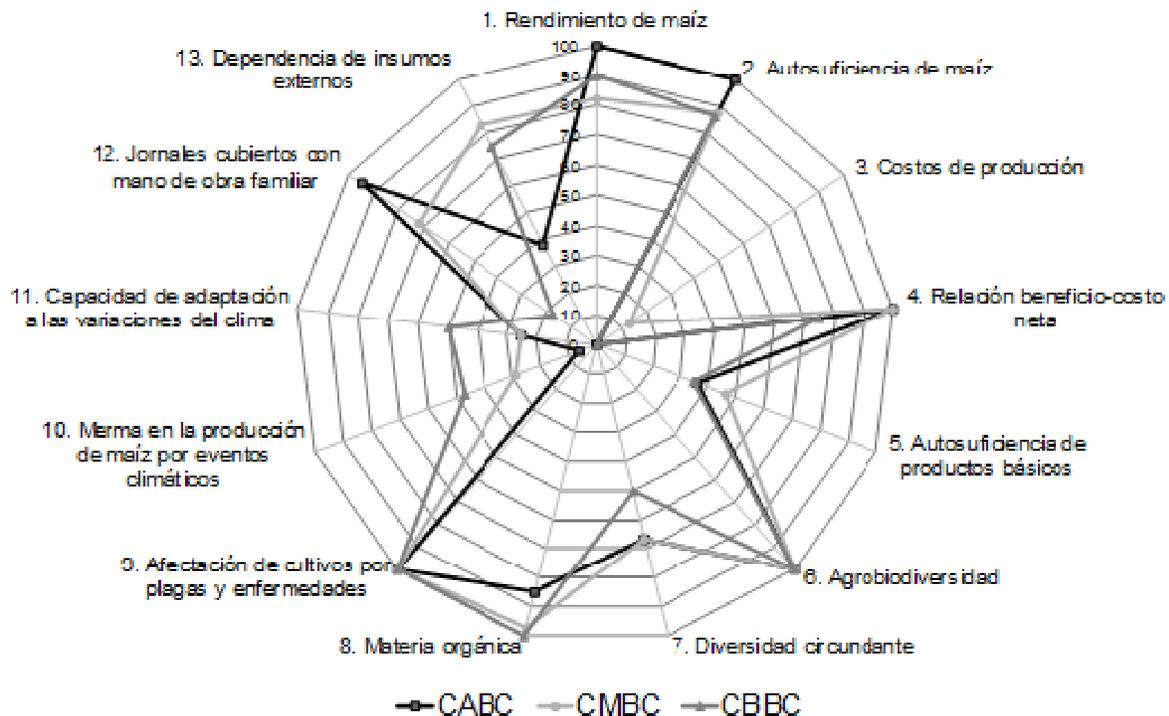


Figura 5. Diagrama de AMIBA de los indicadores de sustentabilidad evaluados en agroecosistemas de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca, 2018. CABC: Conglomerado de Alta relación Beneficio Costo; CMBC: Conglomerado de Media relación Beneficio Costo; CBBC: Conglomerado de Baja relación Beneficio Costo. Indicadores 1-5: atributo productividad; indicadores 6 -10: atributo estabilidad, confiabilidad y resiliencia; indicador 11: atributo adaptabilidad; indicador 12: atributo equidad; indicador 13: atributo autogestión. Los valores 0 y 100 corresponden a la condición crítica y óptima de cada indicador, respectivamente.

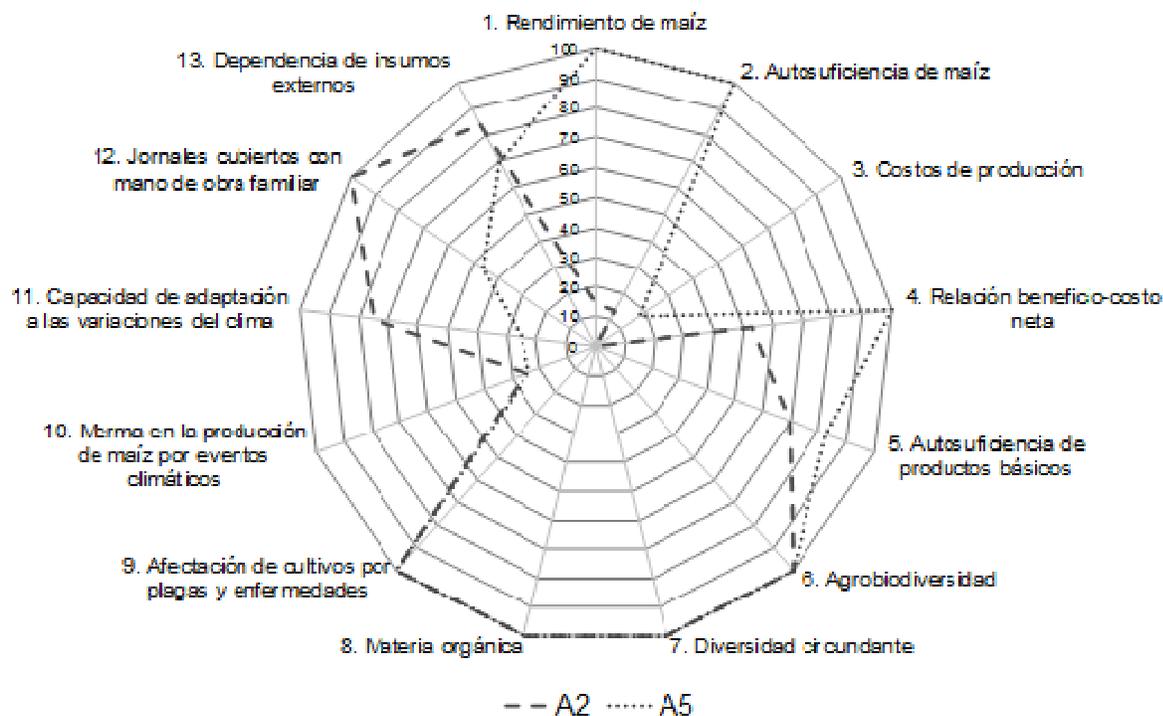


Figura 6. Diagrama de AMIBA de los indicadores de sustentabilidad evaluados en agroecosistemas de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca, 2018. A2: agroecosistema 2; A5: agroecosistema 5. Indicadores 1-5: atributo productividad; indicadores 6-10: atributo estabilidad, confiabilidad y resiliencia; indicador 11: atributo adaptabilidad; indicador 12: atributo equidad; indicador 13: atributo autogestión. Los valores 0 y 100 corresponden a la condición crítica y óptima de cada indicador respectivamente.

## DISCUSIÓN

De acuerdo con el marco MESMIS, un agroecosistema sustentable posee siete atributos básicos: productividad, estabilidad, confiabilidad, resiliencia, adaptabilidad, equidad y autogestión (López-Ridaura et al., 2002). El primero de estos se refiere a la capacidad de brindar un nivel de bienes y servicios mediante el uso eficiente y sinérgico de los recursos naturales y económicos (Maser et al., 1999; López-Ridaura et al., 2002). Al respecto, a excepción del A2, en un buen año de producción todos los sistemas obtienen altos valores en el indicador rendimiento de maíz y, por consiguiente, en el indicador autosuficiencia anual de este grano. Aunque solo el CABC y el A5 alcanzan los valores óptimos en estos dos indicadores, se infiere que se trata de agroecosistemas altamente productivos, a pesar de las restricciones topográficas de la zona, porque obtienen rendimientos por arriba del doble de la media estatal de  $1.1 \text{ t ha}^{-1}$  (SIAP, 2019a) y de los valores reportados para sistemas de producción ubicados en planicies (Domínguez-Hernández et al., 2018; SIAP, 2019b).

El punto más débil referente a la productividad de los agroecosistemas evaluados son los costos de producción (Figuras 6 y 7). Se sabe que en sistemas de agricultura campesina estos son altos debido a su alta demanda de mano de obra (Ebel et al., 2017), sin embargo, los valores encontrados son elevados en comparación con lo reportado para sistemas de producción similares en México (Arnés et al., 2013; Domínguez-Hernández et al., 2018). Esto quizás se debe a que, en la mayoría de los agroecosistemas de estudio la preparación del terreno se realiza con herramientas manuales y, que en todos los casos las labores de deshierbe y arrima (labor para colocar tierra alrededor de la planta) también utilizan este tipo de tecnología.

A pesar de esta situación, en el indicador relación beneficio-costo neta, con excepción del CBBC y del A2, todos los agroecosistemas obtuvieron un valor óptimo. Esto es resultado de la estrategia campesina de uso de mano de obra familiar, que permite disminuir la inversión monetaria y, por lo tanto, incrementar el coeficiente beneficio-costo (Isakson, 2009; Molina-Anzures et al., 2016). Si bien para el CBBC y el A2 los

resultados indican una rentabilidad negativa del cultivo de milpa, esto no es así, dado que en el estudio solo se contabilizaron los beneficios obtenidos por el cultivo de maíz. Al respecto, en un estudio similar Arnés et al.

(2013) encontraron que, al incluir todos los cultivos en el cálculo de la relación beneficio-costo, los sistemas diversificados siempre obtienen coeficientes mayores que 1.0

Por lo anterior, aunque en ocasiones los campesinos mencionan que la agricultura no es rentable, ellos continúan sembrando la milpa porque valoran la totalidad de los cultivos y sus productos derivados, así como otros beneficios no conmensurables (Isakson, 2009), como el consumir alimentos de calidad, la satisfacción de cosechar directamente los cultivos, o el no depender del mercado externo para abastecerse de los granos básicos.

Los indicadores agrobiodiversidad, diversidad circundante y materia orgánica del suelo están relacionados con el estado de conservación de los recursos base que, a su vez se asocian con la estabilidad, confiabilidad y resiliencia del agroecosistema (Ratnadass et al., 2011; Altieri, 2012; Blanco-Canqui & Francis, 2016). Al respecto, la alta agrobiodiversidad que presentan los agroecosistemas estudiados es una estrategia característica de los sistemas campesinos, que diversifica la dieta familiar, mantiene estable la producción y maximiza su rentabilidad (Altieri & Toledo, 2011). Esto puede explicar el por qué las familias campesinas del CBBC y del A2, quienes no alcanzan un coeficiente beneficio-costo óptimo, continúan el cultivo de la milpa. Por otro lado, sugiere que los sistemas de milpa con árboles frutales son altamente pertinentes para asegurar la autosuficiencia alimentaria de las familias rurales (Camas et al., 2012; Turrent et al., 2017).

Diferentes autores mencionan que la agrobiodiversidad (Lin, 2011; Hatt et al., 2018) junto con la diversidad vegetal no agrícola, dentro y en los alrededores de los campos (Ratnadass et al., 2011), pueden promover la regulación natural de plagas y enfermedades que atacan a los cultivos debido a una mayor abundancia de enemigos naturales (Balmer et al., 2013; Ramsden et al., 2015). Dado que en el presente estudio se documentó una baja pérdida de cultivos por plagas, se infiere que la agrobiodiversidad existente en la milpa y la diversidad vegetal circundante a las parcelas, brindan una estructura ecológica que permite la regulación natural de esas poblaciones. Otros autores que han realizado estudios similares en sistemas diversificados, han reportado que el nivel de incidencia de insectos plaga es bajo (Abbona et al., 2007) y menor en comparación con sistemas de monocultivo (Arnés et al., 2013; Domínguez-Hernández et al., 2018).

Dada la importancia del suelo como elemento base del agroecosistema, el mantenimiento de su calidad es de vital importancia para la sustentabilidad del mismo (Karlen et al., 1997), por lo que es fundamental conservar niveles adecuados de materia orgánica (Doran & Zeiss, 2000; Altieri et al., 2015). En todos los sistemas de estudio los valores de esta propiedad fueron altos de acuerdo con la clasificación para zonas templadas (Castellanos et al., 2000). Esto infiere que los campesinos realizan un manejo adecuado del suelo, dado que aun en parcelas con alta pendiente y un

tiempo largo de manejo el porcentaje de materia orgánica se mantuvo alto. Valores similares fueron reportados por Vergara-Sánchez & Etchevers-Barra (2006) para suelos de ladera cultivados con maíz y labranza tradicional en dos microcuencas de la Sierra Norte de Oaxaca.

Los eventos asociados a la variabilidad climática, como sequías y lluvias extremas, ponen en riesgo la resiliencia y, consecuentemente, la sustentabilidad de los sistemas agrícolas porque tienen efectos directos en su productividad (Altieri et al., 2015). Diferentes autores indican que estos eventos impactarán en mayor medida a los sistemas campesinos debido, entre otros factores, a su ubicación en ambientes marginales y su dependencia en las lluvias de temporal (Morton, 2007; Altieri & Nicholls, 2013; Imbach et al., 2017).

En los agroecosistemas de milpa estudiados, en el ciclo 2018 tanto la sequía como las lluvias extremas provocaron una alta merma en la producción de maíz, principal cultivo de la milpa y la dieta familiar (Figuras 6 y 7). Situaciones similares se han reportado en sistemas campesinos de México y Centroamérica (Eakin, 2005; Harvey et al., 2018). En un estudio de dos años consecutivos realizado en sistemas de maíz en el estado de Michoacán, Arnés et al. (2013), documentaron la disminución de más de 50 % en el rendimiento de maíz y el nivel de autosuficiencia familiar debido a la sequía que se presentó en el segundo año. Esto obliga a que las familias campesinas dependan de la compra de los granos básicos para su alimentación (Rogé & Astier, 2015).

Aunque algunos autores sugieren que los sistemas campesinos tienen características y estrategias que les permiten enfrentar este fenómeno (Morton, 2007; Lin, 2011; Altieri & Toledo, 2011), los resultados muestran que la mayoría de los sistemas evaluados no cuentan con estrategias suficientes para minimizar los efectos negativos de la variabilidad climática. Esta situación es preocupante, dado que se pronostica que los eventos como sequías y lluvias extremas se presentarán con mayor frecuencia en el futuro (Seneviratne et al., 2012). Sin embargo, en los talleres participativos algunos productores identificaron prácticas que realizan o pudieran aplicar para minimizar el impacto de los eventos climáticos, por lo que sería importante buscar estrategias de socialización para una implementación comunitaria.

El relevo generacional es otro problema evidente en los agroecosistemas de estudio (Figura 4) porque supone la reducción de mano de obra familiar y la no transferencia del conocimiento generado acerca del manejo de la milpa. Frente a este problema, algunos autores sugieren que son necesarias políticas públicas que incentiven a los jóvenes a permanecer en sus comunidades e involucrarse en la agricultura (Azaola, 2012). Además, Vizcarra et al. (2015) plantean que para asegurar el relevo generacional deberá promoverse el acceso a los recursos productivos, el reconocimiento de los derechos de la mujer, innovaciones productivas que permitan generar ingresos y la reivindicación social tanto de campesinos como de la sociedad respecto a la importancia de la agricultura.

En general, tanto los conglomerados como los estudios de caso son sistemas autogestivos, dado que, a

excepción del CABC, tienen una baja dependencia de fertilizantes (Figura 5 y 6) y la mayoría de ellos no cuenta con apoyos gubernamentales. Desde la teoría de sustentabilidad el no recibir apoyos representa una ventaja para los agroecosistemas, sin embargo, para los campesinos estos apoyos son necesarios porque ayudan a reducir sus gastos de inversión y a motivar el cultivo de la milpa entre los más jóvenes.

## CONCLUSIONES

La agrupación de los agroecosistemas mediante el análisis clúster develó la existencia de tres grupos, diferenciados principalmente por el indicador relación beneficio costo neta, y dos casos atípicos, por su nivel de rendimiento de maíz.

Los elementos que dan mayor sustentabilidad a los agroecosistemas evaluados son la biodiversidad agrícola y circundante, el contenido de materia orgánica del suelo, y la baja dependencia de insumos químicos y apoyos gubernamentales.

La variabilidad climática es el principal factor que pone en riesgo la sustentabilidad de todos los agroecosistemas de milpa, dado que propicia la disminución del rendimiento de maíz, principal cultivo de la asociación.

En los agroecosistemas de milpa, los altos costos de producción son un punto crítico, que bajo la estrategia campesina de uso de mano de obra familiar disminuye la inversión real monetaria y promueve la rentabilidad del cultivo.

El relevo generacional es un problema a futuro para la sustentabilidad de los agroecosistemas, debido a que limita la disponibilidad de mano de obra familiar.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los campesinos y campesinas de La Trinidad Ixtlán, Oaxaca que colaboraron en esta investigación, así como a las autoridades municipales y comunales de la comunidad por el apoyo brindado.

## BIBLIOGRAFÍA

**Abbona, E.A., S.J. Sarandón, M.E. Marasas & M. Astier.** 2007. Ecological sustainability evaluation of traditional management in different vineyard systems in Berisso, Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119: 335-345.

**Aguilar, J., C. Illsley & C. Marielle.** 2003. Los sistemas agrícolas de maíz y sus procesos técnicos. En: Sin maíz no hay país. G. Esteva & C. Marielle (eds.). Ediciones CONACULTA. México. pp. 155-176.

**Altieri, M.A.** 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1971: 1-24.

**Altieri, M.A.** 2012. Insect pest management in the agroecosystems of the future. *Atti Accademia Nazionale Italiana di Entomologia* 60: 137-144.

**Altieri, M.A. & C.I. Nicholls.** 2012. Agroecología: única esperanza para la soberanía alimentaria y la resiliencia socioecológica. *Agroecología* 7: 65-83.

**Altieri, M.A. & C.I. Nicholls.** 2013. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. *Climatic Change* 140: 33-45.

**Altieri, M.A. & V.M. Toledo.** 2011. The agroecological revolution in Latin America: rescuing nature, ensuring food sovereignty and empowering peasants. *Journal of Peasant Studies* 38: 587-612.

**Altieri, M.A., F.R. Funes-Monzote & P. Petersen.** 2012. Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 1-13.

**Altieri, M.A., C.I. Nicholls, A. Henao & M.A. Lana.** 2015. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 869-890.

**Arnés, E., J. Antonio, E. del Val & M. Astier.** 2013. Sustainability and climate variability in low-input peasant maize systems in the central Mexican highlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181: 195-205.

**Arnés, E., M. Astier, O. Marín-González & C.G. Hernández Díaz-Ambrona.** 2018. Participatory evaluation of food and nutritional security through sustainability indicators in a highland peasant system in Guatemala. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 43: 482-513.

**Azaola, M. C.** 2012. Becoming a migrant: aspirations of youths during their transition to adulthood in rural Mexico. *Journal of Youth Studies* 15: 875-889.

**Balmer, O., L. Pfiffner, J. Schied, M. Willareth, A. Leimgruber, H. Luka & M. Traugott.** 2013. Noncrop flowering plants restore top-down herbivore control in agricultural fields. *Ecology and Evolution* 3: 2634-2646.

**Benítez, M., J. Fornoni, L. García-Barrios & R. López.** 2014. Dynamical networks in agroecology: the milpa as a model system. En: *Frontiers in Ecology, Evolution and Complexity*. Benítez, M., O. Miramontes & A. Valiente-Banuet (Eds.). Coplt-arXives. México. pp. 1-14.

**Blanco-Canqui, H. & C.A. Francis.** 2016. Building resilient soils through agroecosystem redesign under fluctuating climatic regimes. *Journal of Soil and Water Conservation* 71: 127A-133A.

**Camas, R., A. Turrent, J.I. Cortés, M. Livera, A. González, B. Villar, J. López, N. Espinoza & P. Cadena.** 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferentes sistemas de manejo en Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 231-243.

**Caporali, F.** 2015. History and Development of Agroecology and Theory of Agroecosystems. En: *Law and Agroecology*. Monteduro, M., P. Buongiorno, S. Di Benedetto, & A. Isoni (Eds.). Ed. Springer-Verlag. Berlín. pp. 3-29.

**Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle-Bueno & A. Aguilar-Santelises.** 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2a ed. San Miguel Allende, Gto. 226 pp.

**CONAGUA-SMN.** (2019). Normales climatológicas 1956-2013. Estación 20041: Ixtlán de Juárez.

- De la Tejera, B. & R. García.** 2008. Agricultura y estrategias de formación de ingreso campesinas en comunidades indígenas forestales oaxaqueñas. En: Instituciones y desarrollo. Ensayos sobre la complejidad del campo mexicano. García, R., B. De la Tejera & K. Appendini (Eds.). Ed. Dirección General de Publicaciones. Cuernavaca pp. 65-104.
- Domínguez-Hernández, M.E., R. Zepeda-Bautista, M.d.C. Valderrama-Bravo, E. Domínguez-Hernández & C. Hernández-Aguilar.** 2018. Sustainability assessment of traditional maize (*Zea mays* L.) agroecosystem in Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 42: 383-406.
- Doran, J.W. & M.R. Zeiss.** 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3-11.
- Eakin, H.** 2005. Institutional change, climate risk, and rural vulnerability: Cases from Central Mexico. *World Development* 33: 1923-1938.
- Eakin, H., H. Perales, K. Appendini & S. Sweeney.** 2014. Selling Maize in Mexico: The Persistence of Peasant Farming in an Era of Global Markets. *Development and Change* 45: 133-155.
- Ebel, R., J.G. Pozas, F. Soria & J. Cruz.** 2017. Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana* 35: 149-160.
- Ebel, R., M.d.J. Méndez & H.R. Putnam.** 2018. Milpa: One Sister Got Climate-sick. The Impact of Climate Change on Traditional Maya Farming Systems. *International Journal of Sociology of Agriculture and Food* 24: 175-199.
- Fox, J. & M. Bouchet-Valat.** 2019. Rcmdr: R commander. R package version 2.5-3.
- Galván-Miyoshi, Y.** 2008. Integración de indicadores en la evaluación de la sustentabilidad: de los índices agregados a la representación multicriterio. En: Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. M. Astier, O. Masera, & Y. Galván-Miyoshi (Eds.) Ed. SEAE, CIGA, ECOSUR, CIEco, UNAM, GIRA, Mundiprensa, Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. España pp. 95-117.
- Galván-Miyoshi, Y., O. Masera & S. López-Ridaura.** 2008. Las evaluaciones de sustentabilidad. En: Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. M. Astier, O. Masera, & Y. Galván-Miyoshi (Eds.) Ed. SEAE, CIGA, ECOSUR, CIEco, UNAM, GIRA, Mundiprensa, Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. España pp. 41-57.
- García-Martínez, Y.G., C. Ballesteros, H. Bernal, O. Villarreal, L. Jiménez-García & D. Jiménez-García.** 2016. Traditional agroecosystems and global change implications in Mexico. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 22: 548-565.
- Gil, J. & J. Vivar.** 2015. La modernización agrícola en México y sus repercusiones en espacios rurales. *Revista Antropologías del Sur*: 51-67.
- Gliessman, S.** 2018. Defining Agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 42: 599-600.
- Gliessman, S.R., F.J. Rosado-May, C. Guadarrama-Zugasti, J. Jedlicka, A. Cohn, V. E. Mendez, R. Cohen, L. Trujillo, C. Bacon, & R. Jaffe.** 2007. Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas* 16: 13-23.
- Guzmán, G.I. & A.M. Alonso.** 2007. La investigación participativa en agroecología: una herramienta para el desarrollo sustentable. *Ecosistemas* 16: 24-36.
- Harvey, C.A., M. Saborio-Rodríguez, M.R. Martínez-Rodríguez, B. Viguera, A. Chain-Guadarrama, R. Vignola & F. Alpizar.** 2018. Climate change impacts and adaptation among smallholder farmers in Central America. *Agriculture & Food Security* 7: 1-20.
- Hatt, S., F. Boeraeve, S. Artru, M. Dufrene & F. Francis.** 2018. Spatial diversification of agroecosystems to enhance biological control and other regulating services: An agroecological perspective. *Science of the Total Environment* 621: 600-611.
- Holt-Giménez, E. & M.A. Altieri.** 2013. Agroecology, Food Sovereignty and the New Green Revolution. *Agroecology and Sustainable Food Systems* 37: 90-102.
- Imbach, P., M. Beardsley, C. Bouroncle, C. Medellin, P. Läderach, H. Hidalgo, E. Alfaro, J. Van Etten, R. Allan, D. Hemming, R. Stone, L. Hannah & C. I. Donatti.** 2017. Climate change, ecosystems and smallholder agriculture in Central America: an introduction to the special issue. *Climatic Change* 141: 1-12.
- INEGI.** 2008. Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>. Último acceso: junio 2019.
- INEGI.** 2005. Conjunto de datos edafológicos. Escala 1:1 000 000 serie I. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267636>. Último acceso: junio 2019.
- IRI.** 2018. GAUGE\_BASED GLOBAL v1p0 extREALTIME Precipitation from NOAA NCEP CPC UNIFIED\_PRCP: CPC Unified Precipitation Analyses (On line). International Research Institute for Climate and Society. Earth Institute. Columbia University. Disponible en: [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.CPC/.UNIFIED\\_PRCP/.GAUGE\\_BASED/.GLOBAL/.v1p0/.extREALTIME/.rain/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.CPC/.UNIFIED_PRCP/.GAUGE_BASED/.GLOBAL/.v1p0/.extREALTIME/.rain/) Último acceso: julio 2019.
- IRI.** 2019. Minimum temperature at 2 m from NASA GSFC MERRA2 Anl\_MonoLev: 2D Variables (On line). International Research Institute for Climate and Society. Earth Institute. Columbia University. Disponible en: [http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NASA/.GSFC/.MERRA2/.Anl\\_MonoLev/.t2mmin/](http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NASA/.GSFC/.MERRA2/.Anl_MonoLev/.t2mmin/) Último acceso: julio 2019.
- Isakson, S.R.** 2009. No hay ganancia en la milpa: the agrarian question, food sovereignty, and the on-farm conservation of agrobiodiversity in the Guatemalan highlands. *The Journal of Peasant Studies* 36: 725-759.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris & G.E. Schuman.** 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
- Koohafkan, P., M.A. Altieri & E. Holt-Gimenez.** 2012. Green Agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *International Journal of Agricultural Sustainability* 10: 61-75.

- Landini, F.** 2011. Racionalidad económica campesina. *Mundo Agrario* 12 n° 23.
- Lin, B.B.** 2011. Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience* 61: 183-193.
- Linares, E. & R. Bye.** 2011. ¡La milpa no solo es maíz! En: Álvarez-Buylla, E., A. Carreón & A. San Vicente (eds.). *Haciendo milpa. La protección de las semillas y la agricultura campesina*. Ed. UNAM. México pp. 9-12.
- López-Ridaura, S., O. Maserá & M. Astier.** 2002. Evaluating the sustainability of complex socio-environmental system. *The MESMIS framework*. *Ecological Indicators* 35: 1-14.
- Magdaleno-Hernández, E., M.A. Jiménez-Velázquez, T. Martínez-Saldaña, & B. Cruz-Galindo.** 2014. Estrategias de las familias campesinas en Pueblo Nuevo, municipio de Acambay, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 11: 167-179.
- Maserá, O., M. Astier & S. López-Ridaura.** 1999. Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS. Ed. MP, GIRA A.C. México. 139 pp.
- Maserá, O., M. Astier, S. López-Ridaura, Y. Galván-Miyoshi, T. Ortiz-Ávila, L.E. García-Barrios, R. García-Barrios, C. González, & E. Speelman.** 2008. El proyecto de evaluación de sustentabilidad MESMIS. En: Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico y multidimensional. Astier, M., O. Maserá & Y. Galván-Miyoshi (eds.). Ed. SEAE, CIGA, ECOSUR, CIEco, UNAM, GIRA, Mundiprensa, Fundación Instituto de Agricultura Ecológica y Sustentable. España pp. 13-23.
- Molina-Anzures, M.F., J.L. Chávez-Servia, A. Gil-Muñoz, P.A. López, E. Hernández-Romero & E. Ortiz-Torres.** 2016. Eficiencias productivas de asociaciones de maíz, frijol y calabaza (*Curcubita pepo* L.) intercaladas con árboles frutales. *Revista Internacional de Botánica Experimental* 85: 36-50.
- Montes, E.R.** 2016. La milpa amatleca como estrategia de vida. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México 208 pp.
- Morton, J.F.** 2007. The impact of climate change on smallholder and subsistence agriculture. *PNAS* 104: 19680-19685.
- Nicholls, C.I., M.A. Altieri & L.L. Vázquez.** 2015. Agroecología: principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas. *Agroecología* 10: 61-72.
- Pretty, J.** 2008. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363: 447-465.
- Ramsden, M.W., R. Menéndez, S.R. Leather & F. Wäckers.** 2015. Optimizing field margins for biocontrol services: The relative role of aphid abundance, annual floral resources, and overwinter habitat in enhancing aphid natural enemies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 199: 94-104.
- Ratnadass, A., P. Fernandes, J. Avelino & R. Habib.** 2011. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 273-303.
- Rodríguez, A. & L.M. Arias.** 2014. La milpa y el maíz: retos al desarrollo rural en México y Perú. *Etnobiología* 12: 76-89.
- Rogé, P. & M. Astier.** 2015. Changes in Climate, Crops, and Tradition: Cajete Maize and the Rainfed Farming Systems of Oaxaca, Mexico. *Human Ecology* 43: 639-653.
- Sánchez De P, M., M. Prager, R.E. Naranjo & O.E. Sanclemente.** 2012. El suelo, su metabolismo, ciclaje de nutrientes y prácticas agroecológicas. *Agroecología* 7: 19-34.
- Sarandón, S.J.** 2019. Potencialidades, desafíos y limitaciones de la investigación agroecológica como un nuevo paradigma en las ciencias agrarias. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. UNCUYO* 51: 383-394.
- Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera & X. Zhang.** 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. En: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken, K. L. Ebi, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, G.-K. Plattner, S. K. Allen, M. Tignor, & P. M. Midgley (Eds.). Ed. Cambridge University Press. USA pp. 109-230.
- Sevilla, E. & G. Woodgate.** 2013. Agroecología: fundamentos del pensamiento social agrario y teoría sociológica. *Agroecología* 8: 27-34.
- SIAP.** 2019a. Avance de siembras y cosechas. Resumen nacional por estado. Disponible en: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalCultivo.do) Último acceso: mayo 2019
- SIAP.** 2019b. Avance de siembras y cosechas. Resumen por estado. Disponible en: [http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola\\_siap\\_gobmx/ResumenProducto.do](http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do) Último acceso: julio 2019
- Turrent, A., A. Espinosa, J.I. Cortés & H. Mejía.** 2014. Análisis de la estrategia MasAgro-maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 5: 1531-1547.
- Turrent, A., J.I. Cortés, A. Espinosa, E. Hernández, R. Camas, J.P. Torres & A. Zambada.** 2017. MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 8: 1169-1185.
- UZACHI.** 2014. Plan de Manejo Forestal La Trinidad Ixtlán. Anexos. 117 pp.
- Vergara-Sánchez, M.A. & J.D. Etchevers-Barra.** 2006. Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México *Agrociencia* 40: 557-567.
- Vizcarra, I., H. Thomé & C.D. Hernández.** 2015. Miradas al futuro: el relevo generacional en el desarrollo de la conciencia social como estrategia de conservación de los maíces nativos. *Carta Económica Regional* 55-73.
- Weiner, J.** 2017. Applying plant ecological knowledge to increase agricultural sustainability. *Journal of Ecology* 105: 865-870.