

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

La sustentabilidad de los sistemas agroforestales campesinos de San Andrés Calpan, Calpan, Puebla

La sustentabilidad de los sistemas agroforestales

Sustainability of peasant agroforestry systems of San Andrés Calpan, Calpan, Puebla

Authors/Autores: Reyes Reyes, A. K., Ocampo Fletes, I., Ramírez Valverde, B., Ortiz Torres, E., Sánchez Morales, P., Acosta Mireles, M.

ID: e1660

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1660>

Received/Fecha de recepción: April 12th 2024

Accepted /Fecha de aceptación: October 03th 2024

Available online/Fecha de publicación: October 18th 2024

Please cite this article as/Como citar este artículo: Reyes Reyes, A. K., Ocampo Fletes, I., Ramírez Valverde, B., Ortiz Torres, E., Sánchez Morales, P., Acosta Mireles, M. (2024). Sustainability of peasant agroforestry systems of San Andrés Calpan, Calpan, Puebla. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1660. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1660>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original

La sustentabilidad de los sistemas agroforestales campesinos de San Andrés Calpan, Calpan, Puebla

La sustentabilidad de los sistemas agroforestales

Sustainability of peasant agroforestry systems of San Andrés Calpan, Calpan, Puebla

La sustentabilidad de los sistemas agroforestales / Sustainability of peasant agroforestry systems

Reyes Reyes, A. K¹, Ocampo Fletes, I.¹, Ramírez Valverde, B.¹, Ortiz Torres, E.¹,
Sánchez Morales, P.², Acosta Mireles, M.³

¹Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla No. 205, Santiago Momoxpan, municipio de San Pedro Cholula, Puebla, C.P. 72760, Puebla, México. ²Centro de Agroecología, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Km 1.7 Carretera a San Baltazar Tetela, Ecocampus Valsequillo BUAP, Edificio Val 1, San Pedro Zacachimalpa, C.P. 72960, Municipio de Puebla, Puebla, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Carretera México Tepexpan Sn, Texcoco de Mora Centro, 56100 Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding Author:

Ignacio Ocampo-Fletes. Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla No. 205, Santiago Momoxpan, municipio de San Pedro Cholula, Puebla, C.P. 72760, Puebla, México.
Teléfono: +52(222) 285 1445. Ext. 2032. E-mail: ocampoif@colpos.mx

RESUMEN

Los sistemas agroforestales (AFS) proporcionan beneficios económicos, socioculturales y ambientales. La combinación de elementos de la agricultura y forestaría los convierte en sistemas multifuncionales y más sustentables. El objetivo del estudio es evaluar la sustentabilidad¹ de AFS con diferente manejo, en San Andrés Calpan, municipio de Calpan, Puebla, México. El estudio se realizó en dos etapas: en la primera se elaboró una caracterización, para lo cual se aplicó una encuesta a una muestra de 81 productores de una población de 527 registrados en PROAGRO. Se identificaron tres tipos: Sistema Agroforestal Tejocote (TAFS) y Sistema Agroforestal Capulín (CAFS) ambos con manejo tradicional, y el Sistema Agroforestal Manzana (AAFS) con un manejo especializado. En la segunda etapa se seleccionaron seis huertos, dos de cada sistema. Durante un año se registraron las actividades realizadas por los productores. Se utilizó el MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de los Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad). Es un estudio transversal comparativo, se analizaron 19 indicadores. Los resultados muestran que los AFS tradicionales tienden más a la sustentabilidad (66 % para el CAFS y 61 % para el TAFS); el sistema alternativo AAFS obtuvo un 45 %. Se concluye que los SAF tradicionales son más sustentables.

¹ Para este estudio los autores utilizan el concepto de “sustentabilidad”. Cuando citan a otros autores utilizan “sustentabilidad” o “sostenibilidad” según como lo nombran ellos.

PALABRAS CLAVE:

Agroecosistemas sustentables, agricultura familiar, agroforestería, indicadores, multifuncionalidad agrícola.

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) provide economic, sociocultural and environmental benefits. The combination of elements of agriculture and forestry makes them multifunctional and more sustainable systems. The objective of this study is to evaluate the sustainability² of AFS with different management, in San Andrés Calpan, municipality of Calpan, Puebla, Mexico. The study was carried out in two stages: a characterization was developed in the first, for which a survey was applied to a sample of 81 producers out of a population of 527 registered in PROAGRO. Three types were identified: the Tejocote Agroforestry System (TAFS) and the Capulín Agroforestry System (CAFS), both with traditional management, and the Apple Agroforestry System (AAFS) with specialized management. In the second stage, six orchards were selected, two from each system; the activities carried out by the producers were recorded for one year. The MESMIS (Framework for the Evaluation of Natural Resource Management Systems incorporating Sustainability Indicators) was used. It is a comparative cross-sectional study where 19 indicators were analyzed. The results show that traditional AFS tend more towards sustainability (66 % for CAFS and 61 % for TAFS); the alternative AAFS system obtained 45 %. The conclusion is that traditional AFS are more sustainable.

KEY WORDS:

Sustainable agroecosystems, family farming, agroforestry, indicators, agricultural multifunctionality.

Introducción

Actualmente la agricultura es muy diversa en sus formas de manejo; existen sistemas con una alta productividad a base de un uso intensivo de insumos externos y de tecnología, y sistemas tradicionales como la agricultura campesina que se caracterizan por utilizar los recursos locales y desarrollar diferentes estrategias adaptativas a diversas restricciones de tipo económico y ambiental (Hernández & Alcaraz, 2020).

Estas estrategias están relacionadas con una gestión adecuada de sus recursos, diversificación dentro y fuera del agroecosistema, conservación de conocimiento autóctono y valores culturales, así como algunas relaciones sociales favorables a los productores, que en conjunto contribuyen a la generación y conservación de prácticas agroecológicas (Fonseca-Carreño *et al.*, 2019), que proporcionan a los sistemas tradicionales estabilidad y productividad, como ocurre en los Sistemas Agroforestales (AFS) (Altieri & Koohafkan, 2008).

Los AFS son sistemas de uso de la tierra que combinan plantas leñosas perennes (árboles, arbustos, palmas o bambús) con cultivos agrícolas o animales en la misma parcela con algún tipo de disposición espacial y cronológica, y pueden proveer gran variedad de beneficios económicos, socioculturales y ambientales (Navia, 2017).

En el mundo existen alrededor de 400 millones de hectáreas manejadas como AFS, donde el amplio espectro de asociaciones vegetales potencia la producción de madera, leña, frutas, alimentos, medicinas, forraje, aceites y plantas ornamentales (Torres *et al.*, 2019). La combinación de estos elementos los convierte en sistemas orientados a la sustentabilidad (Farrell & Altieri, 1997).

La sustentabilidad ofrece una oportunidad para mejorar el bienestar humano conservando los recursos naturales. Mientras que los sistemas agrícolas producen la mayoría de los alimentos, provocan una degradación ambiental significativa. Esta tensión entre los objetivos de desarrollo y

² Para este estudio los autores utilizan el concepto de “sustentabilidad”. Cuando citan a otros autores utilizan “sustentabilidad” o “sostenibilidad” según como lo nombran ellos.

conservación ambiental no es un resultado inmutable, ya que los sistemas agrícolas son a la vez dependientes y proveedores de servicios ecosistémicos.

Reconocer esta dualidad permite la integración de los objetivos ambientales y de producción, y aprovecha los servicios del ecosistema agrícola para lograr los objetivos de sostenibilidad (DeClerck *et al.*, 2016). En este sentido, Conway (1985) considera la sustentabilidad de la agricultura como “la capacidad de un agroecosistema para mantener su producción a través del tiempo superando, por un lado, las tensiones y forzamientos ecológicos y, por otro, las presiones de carácter socioeconómico”.

Se consideran objetivos de agricultura sustentable, la producción estable y eficiente, seguridad y autosuficiencia alimentaria, uso de prácticas agroecológicas o tradicionales, preservación de la cultura local y la pequeña propiedad, asistencia de los más pobres a través de un proceso de autogestión, alto nivel de participación de la comunidad, y la conservación y regeneración de los recursos naturales (Altieri & Nicholls, 2000).

Lo anterior implica la combinación de diversas prácticas tecnológicas y sociales como en la agricultura campesina, enmarcada en una diversidad de estrategias que los campesinos utilizan para manejar sus agroecosistemas (Altieri *et al.*, 2012). En este sentido algunos AFS presentan características con un manejo más tradicional, constituidos por un cultivo básico principal (maíz), que puede estar intercalado con otros cultivos como calabaza, frijol, chile y haba, y con árboles frutales, denominados MIAF (Milpa Intercalada con Árboles Frutales).

El MIAF está constituido por tres especies: el árbol frutal (epicultivo), el maíz (mesocultivo) y frijol u otra especie comestible (sotocultivo) en intensa interacción agronómica y que tiene como propósitos la producción de maíz y frijol para la seguridad alimentaria, incrementar el ingreso familiar, aumentar el contenido de materia orgánica, controlar la erosión hídrica del suelo y un uso más eficiente de la mano de obra familiar (Cortés *et al.*, 2005).

Estos sistemas AFS están presentes en la zona de estudio, los cuales han sido transformados según los objetivos de cada unidad de producción familiar, y se refleja en el manejo y en la diversidad de especies que componen sus sistemas. Este estudio se realizó en San Andrés Calpan, municipio de Calpan, Puebla, México. Es un área geográfica que reúne las condiciones agroclimáticas para el desarrollo de sistemas AFS tradicionales diversos, por lo que el objetivo es evaluar la sustentabilidad de sistemas agroforestales con diferente manejo. Se planteó la hipótesis que los sistemas con características más tradicionales son más sustentables que los AFS especializados.

Material y Métodos

Características del área de estudio

El estudio se realizó en la localidad de San Andrés Calpan, ubicada en la parte centro oeste del estado de Puebla, México. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 19° 06'36" y 19° 41'12" de LN y los meridianos 98° 23'54" y 98° 32'24" de LW, con una altitud entre 2,200 y 3,200 metros sobre el nivel de mar. En San Andrés Calpan se encuentran agroecosistemas con diversidad de árboles frutales intercalados con cultivos anuales. Los frutales que constituyen los diversos AFS en la zona son: capulín (*Prunus salicifolia*), tejocote (*Crataegus mexicana*), pera (*Pyrus communis*), ciruela (*Prunus domestica*), nogal (*Juglans regia*), higo (*Ficus carica*) y durazno (*Prunus pérsica*). Y los cultivos anuales son: maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*), calabacita (*Cucurbita pepo*) y haba (*Vicia faba*).

Enfoque de la investigación

Se emplearon técnicas cuantitativas y cualitativas para analizar los aspectos ambientales, económicos y sociales considerados en la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas seleccionados (Tonolli *et al.*, 2019).

Población y muestreo

Se seleccionaron los AFS con manejo tradicional y los AFS con manejo especializados con tecnología generada por la investigación. Para la selección de los AFS con manejo tradicional,

primero se realizó una caracterización de sistemas con información de los productores. A partir de una población de 527 productores de maíz (registro de PROAGRO de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, SADER, 2018), se obtuvo un tamaño de muestra resultando 81 productores. Para determinar el tamaño de muestra se utilizó la siguiente expresión (Ecuación 1) matemática considerando la varianza máxima:

$$n = \frac{N Z_{\alpha/2}^2 (0.25)}{N d^2 + Z_{\alpha/2}^2 (0.25)}$$

Dónde:

N= Número de productores

Z($\alpha/2$)= 1.96 (valor de la tabla de la distribución normal)

α =0.05 (es decir, se tiene una confiabilidad del 95 %)

d= precisión (0.1)

n= 81

Luego se identificaron los 81 productores con AFS que siembran el maíz entre árboles frutales, a los que se les aplicó un cuestionario. Se consideró como MIAF especializado al que se encuentra en etapa de transferencia tecnológica en parcelas de los productores, que se caracteriza por tener como frutal el manzano con tecnología generada por el programa de investigación.

Elección de grupos y selección de parcelas

Los dos grupos pertenecientes a los AFS tradicionales fueron elegidos de acuerdo a los resultados de la caracterización propuesta por Toledo *et al.* (1999), seleccionando aquellos con amplia representatividad en la zona y de la categoría tradicional: capulín (Sistema Agroforestal Capulín, CAFS) y tejocote (Sistema Agroforestal Tejocote, TAFS), estos fueron comparados con el de manzano (Sistema Agroforestal Manzana, AAFS). De cada uno se eligieron dos parcelas para tener una repetición, en total seis parcelas (2 CAFS, 2 TAFS y 2 AAFS) a las que durante un año se dio seguimiento para registrar las actividades que realiza el productor (Figura 1).

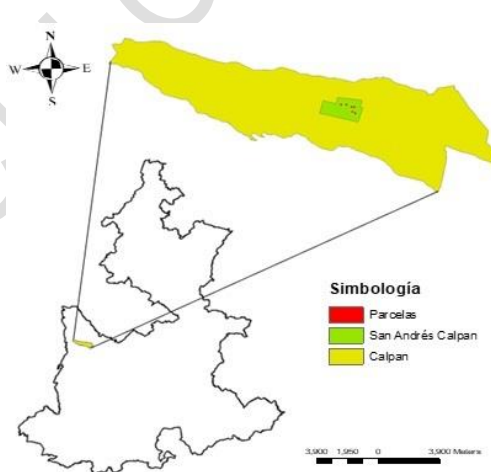


Figura 1. Ubicación geográfica de la localidad de San Andrés Calpan y las parcelas evaluadas. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2015

Metodologías para la evaluación de la sustentabilidad

En décadas recientes ha surgido la inquietud por encontrar mecanismos que permitan evaluar la sustentabilidad de los sistemas productivos. La evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícolas mediante el uso de una metodología que incorpore diversos indicadores, permite observar la tendencia en el desarrollo de los sistemas productivos. En este sentido se han diseñado diferentes metodologías, como la propuesta por Sarandón y Flores (2009) que consiste en una serie de pasos que conducen a la obtención de un conjunto de indicadores adecuados para evaluar los puntos críticos de la sustentabilidad de los agroecosistemas, buscando que sea sencilla, de bajo costo y que permita evaluar aquellos aspectos que comprometen el logro de la sustentabilidad de los sistemas agrícolas.

El SAFE (Sustainability Assessment of Farming and the Environment Framework), es una metodología desarrollada por Sauvenier *et al.* (2006), la cual propone evaluar la sustentabilidad en tres escalas: sistema agrario, explotación agrícola y parcela; posteriormente Van Cauwenbergh *et al.* (2007), propuso evaluar mediante el empleo de una estructura jerárquica. SAFE deriva sus principios y criterios a partir de la combinación de las funciones de la agricultura con las tres bases de la sustentabilidad, lo que permite la obtención de indicadores para cada una de las dimensiones (económica, social y ambiental). Es difícil llegar a la obtención de los indicadores integrados ya que el método propuesto por Sauvenier *et al.* (2006) para el análisis estadístico de los indicadores se basa en el estudio multivariante, que utiliza la metodología de lógica difusa para estimar las ponderaciones entre variables; estas reglas de razonamiento impiden que las variables sean extrapoladas a otros ámbitos (Saavedra, 2015).

El FESLM (Framework of Evaluating Sustainability of Land Management) es una metodología desarrollada por Smyth y Dumanski (1993) para la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), que consiste en una estrategia de análisis integral del manejo de tierras agrícolas, orientado hacia la dimensión medioambiental con el objetivo de prevenir la degradación del suelo, pero incluyendo también aspectos económicos y sociales.

El MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad) fue desarrollado por Masera *et al.* (1999) para evaluar la sustentabilidad de las explotaciones agrícolas por medio del análisis multicriterio. MESMIS es una de las herramientas más útiles para actividades agrícolas, forestales y pecuarias de las comunidades rurales, que permite entender de manera integral las limitantes y posibilidades para la sustentabilidad de los sistemas de manejo (Masera *et al.*, 1999), por lo que se seleccionó como la metodología para este estudio.

El MESMIS como herramienta metodológica de evaluación

La herramienta metodológica utilizada para evaluar la sustentabilidad fue el MESMIS (Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de los Recursos Naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad) propuesto por Masera *et al.* (1999). Se analizaron 19 indicadores, los cuales fueron seleccionados mediante revisión bibliográfica y el seguimiento a cada parcela durante al año agrícola, para registrar todas las prácticas.

Se asignó un valor ponderado a cada uno de los indicadores para poder integrar los resultados y representarlos gráficamente, considerando el 100 % el valor del óptimo establecido.

Se realizó un estudio transversal, con escala temporal de dos años: 2018 y 2019, y espacial a nivel de parcela. Se compararon tres AFS: capulín, tejocote (tradicionales) y manzano (alternativo).

Descripción de los indicadores de sustentabilidad

Productividad

1) Rendimiento del Cultivo Básico (Ecológico): Cantidad en toneladas cosechadas por hectárea de maíz ($t\ ha^{-1}$).

2) Rendimiento del Frutal (Ecológico): Relación entre el mejor rendimiento del frutal de interés en la zona (capulín, tejocote y manzana) con respecto al rendimiento obtenido en los sistemas seleccionados ($t\ ha^{-1}$).

3) Eficiencia Relativa de la Tierra (REL) (Ecológico): Área total requerida en cultivo simple para alcanzar los rendimientos obtenidos en policultivo. Una REL mayor a uno significa que el cultivo intercalado es mejor que el cultivo simple; mientras más alto sea el valor de REL el cultivo intercalado será más ventajoso ($t\ ha^{-1}$) (Turrent *et al.*, 2015).

4) Relación Beneficio-Costo (Económico): Representa la eficiencia económica de los recursos utilizados y muestra la cantidad de dinero que retorna por cada unidad monetaria invertida durante un período determinado (Herrera *et al.*, 1994). Este indicador mide la relación que existe entre los ingresos de un proyecto y los costos incurridos a lo largo de su vida útil incluyendo la inversión total. $B/C > 1$, el proyecto es rentable, ya que el beneficio es superior al costo; $B/C = 1$, es indiferente realizar el proyecto, porque no hay beneficio ni pérdidas; $B/C < 1$, el proyecto no es rentable y debe rechazarse (Vásquez *et al.*, 2017).

Resiliencia, Estabilidad y Confiabilidad

5) Índice de Prácticas Agroecológicas (IA) (Ecológico): Número de prácticas agroecológicas de manejo del agroecosistema en relación con el total de prácticas (11 prácticas) que se realizan. De acuerdo con Herrera *et al.* (2017), cuando: $IA = 1$ El sistema es agroecológico; $1 > IA \geq 0.75$. El sistema es altamente agroecológico; $0.75 > IA \geq 0.5$. El sistema es medianamente agroecológico; $0.5 > IA \geq 0.25$. El sistema es pobremente agroecológico; $0.25 > IA$. El sistema no es agroecológico.

6) Diversidad Biológica Vegetal (Ecológico): Es la abundancia de las especies encontradas en una determinada unidad de estudio. Para ello se utilizó el índice de Shannon, que plantea que “la mayor diversidad corresponde a la mayor incertidumbre en escoger aleatoriamente un individuo de una especie en particular” (Gliessman, 2002, p. 242).

7) Captura de Carbono (Ecológico): Cantidad de biomasa por hectárea capturada, la cual está en función de la heterogeneidad de los componentes del sistema. El carbono almacenado se expresa en tC/ha (Arévalo *et al.*, 2003). Para cada especie se desarrolló la ecuación pertinente a partir de un muestreo previo de ramas de cada especie.

$$\text{Manzano: } B = -0.5562(D^2L)^2 + 74.23(D^2L) - 77.905$$

$$\text{Tejocote: } B = 29.422(D^2L) + 118.35$$

$$\text{Capulín: } B = 325.97D - 941.34$$

Dónde: B= biomasa; D = diámetro; L = longitud

La R^2 para cada especie fue: Manzano: 0.9784; Tejocote: 0.8839 y Capulín: 0.9248.

8) Acceso a Créditos y Seguros (Económico): Número de créditos y/o seguros que posee el productor en relación a su sistema agroforestal.

Adaptabilidad

9) Apropiación de Innovaciones Tecnológicas (Social): Número de prácticas nuevas que el agricultor incorporó en su sistema. De acuerdo con Herrera *et al.* (2017) se establece el siguiente criterio para clasificar al sistema según el número de prácticas nuevas que realiza, donde se considera altamente innovador cuando se tenga arriba de un 70 % de prácticas nuevas (8 prácticas) con respecto al número de prácticas totales (11 prácticas): No. de prácticas nuevas > 8 = altamente innovador; Entre 4 y 7 = medianamente innovador; Entre 1 y 3 = Escasamente innovador; 0 = Sin innovación.

Equidad

10) Índice de Equipo por Productor (Económico): Relación entre los equipos que posee el productor con respecto a los equipos que ocupa (tractor, yunta, machete, bomba, azadón, tijeras, pala). Se asignó un valor ponderado de acuerdo a la contribución del equipo para la sustentabilidad del sistema, y a su necesidad de uso.

$$IEP = T(0.1) + B(0.1) + Y(0.5) + I(0.3)$$

Dónde: T= tractor; B= bomba para aplicar agroquímicos; Y= yunta; I= Implementos (azadón, machete, tijeras, pala, escalera).

11) Grado de Adoptabilidad (Social): Porcentaje de productores en la localidad que han adoptado los diferentes sistemas evaluados.

Autogestión

12) Índice de Seguridad Alimentaria (IFS) (maíz) (Social):

$$IFS = \frac{(R)(SS)/NMF}{500^*}$$

Dónde: R= rendimiento de maíz en kg ha⁻¹; SS= superficie sembrada (ha); NMF= número de miembros en la familia del productor; *Factor que equivale a 500 kg de maíz por año.

De acuerdo con Damián y Toledo (2016) cuando: IFS<1: no existe seguridad alimentaria y IFS≥1: se cuenta con seguridad alimentaria.

13) Autosuficiencia Genética (Social): Porcentaje de semilla de cultivo básico ocupada en este ciclo, que se obtuvo del sistema evaluado de ciclos anteriores.

14) Independencia a Insumos Externos (Socio-económico): Cantidad de fertilizantes, insecticidas, fungicidas y herbicida que aplican al sistema (kg ha⁻¹ año) que provienen del exterior del agroecosistema.

Volumen total: kg ha⁻¹ de fertilizante + kg ha⁻¹ de insecticidas + kg ha⁻¹ de fungicidas + kg ha⁻¹ de herbicidas

Para los agroquímicos en presentación líquida, se consideró su densidad para realizar la conversión a su peso en kg.

15) Mano de Obra (Social): Porcentaje de mano de obra proveniente de la familia.

16) Relevé Intergeneracional (Social): Participación de integrantes de la familia más jóvenes en las actividades del agroecosistema.

17) Ingresos del Agroecosistema Forestal a la Unidad Familiar (Económico):

Porcentaje de Ingresos provenientes del AFS= AI/ TI *100

Donde: AI = Ingresos provenientes del agroecosistema; TI= Ingresos totales de la unidad familiar

Fuentes de ingresos: a) producción de maíz, b) producción de otros cultivos anuales, c) frutales, d) venta de mano de obra, e) programas sociales y f) otros oficios.

18) Diversificación de la Venta (Económico): Cantidad de productos diferentes provenientes del sistema que están disponibles para la venta.

19) Canales de Comercialización (Económico): Número de vías posibles que el productor tiene para poder colocar sus productos en los diferentes mercados.

Resultados y Discusión

Productividad

Los resultados de los sistemas evaluados con respecto a un óptimo establecido de acuerdo a la zona se muestran en la Tabla 1. En el indicador rendimiento de cultivo básico, el AAFS se encuentra más cercano al óptimo (6 t ha⁻¹) con una producción de 4.5 t ha⁻¹ mientras los TAFS y CAFS presentaron rendimientos más bajos, 2.5 y 2.75 t ha⁻¹, respectivamente. El AAFS sólo tienen una especie frutal (manzana), por lo que los callejones con el maíz (cultivo básico), tienen mayor espacio y el frutal un mejor manejo de poda, por lo que tienen un rendimiento por encima del promedio para el municipio de Calpan (2.4 t ha⁻¹) (SIAP, 2018). El AAFS es el único que recibe asesoría externa. En este sentido, los TAFS y los CAFS presentan mayor diversidad de frutales, mientras el maíz básicamente es para autoconsumo.

Con respecto al índice de rendimiento del frutal, los TAFS son superiores con rendimientos de 5.9 t ha⁻¹ más cercanos al óptimo encontrado en la zona (7 t ha⁻¹), mientras los AAFS presentan un rendimiento promedio de 1.0 t ha⁻¹ en relación de las 15.0 t ha⁻¹ del óptimo reportadas en el sistema MIAF experimental (García, 2020). Un elemento determinante de este resultado es que los AFS tradicionales tienen especies que han sido introducidas desde hace muchos años, mientras que la manzana mejorada es una especie que está siendo reintroducida en la zona con otras variedades, además de requerir un manejo tecnológico más especializado para poder alcanzar los rendimientos que reportan los resultados de la investigación.

En la REL, los AFS tradicionales tienen valores muy semejantes: 1.26 para el TAFS y 1.24 para el CAFS, lo que indica que se requiere 1.26 y 1.24 hectáreas de monocultivo para alcanzar los rendimientos de una hectárea del policultivo, valor más cercano al óptimo de 1.3. Los resultados anteriores son menores a los reportados por Turrent *et al.* (2017), REL 1.53 para un experimento de durazno, maíz y frijol arbustivo de temporal; sin embargo, son superiores a la unidad por el arreglo topológico diferente al de la milpa histórica. Hernández (2022) reporta que en diversas modalidades de MIAF, la REL resultó mayor, lo que indica una ventaja sobre cultivos simples; sin embargo, contrasta con lo obtenido en el AAFS que requiere 0.79 ha de monocultivo para obtener el rendimiento de una hectárea de policultivo. Una REL mayor a uno significa que el cultivo intercalado es mejor que el cultivo simple y viceversa. Mientras más alto sea el valor de REL el cultivo será más ventajoso (Albino *et al.*, 2015). En los sistemas tradicionales, que poseen mayor agrobiodiversidad, se propicia una mejor relación entre sus componentes, por lo que se obtienen mejores rendimientos que si se manejará a través de monocultivo. En los AAFS ocurre lo contrario, por lo que se sugiere revisar el arreglo propuesto.

En la relación beneficio-costo (ingresos entre costos), el AAFS obtuvo un valor de 1.56, valor muy semejante a los obtenidos en sistemas MIAF que se han establecido recientemente con durazno en la zona, donde Regalado-López *et al.* (2020) reportan que la relación beneficio costo es de 1.72 y desde el punto de vista económico refleja una rentabilidad atractiva para los productores. Esto mismo ocurrió en MIAF con durazno en condiciones de ladera en la sierra norte de Oaxaca: en la región mazateca, resultó entre 1.49 y 1.61, y en la región mixe, entre 1.48 y 1.62, mostrando ser un sistema rentable por un periodo de 15 años (Jiménez *et al.*, 2016). Los AFS tradicionales presentan mayor ventaja, en especial para el TAFS con un valor de 2.32; es decir, que por cada peso invertido se obtienen una ganancia de 1.32 pesos, resultando más rentables los CAFS y TAFS. En el caso del capulín la inversión es mínima, obteniendo ganancias de la venta del fruto, y en caso de que sea afectado por plagas (gusano de la fruta) se vende la semilla (hueso de la fruta). En los TAFS, el frutal se encuentra bien colocado en el mercado. Calpan es identificado por una alta producción de tejocote con una superficie sembrada de 128 hectáreas y una producción de 843 t anuales (SIAP, 2023); Lozano *et al.* (2016) refiere que este frutal es una fuente de pectina de buena calidad, con posibles aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y otras. Robles *et al.* (2020) señalan que este fruto no sólo es utilizado como alimento para el consumo humano, sino también como ornamento en celebraciones y en la medicina tradicional.

Resiliencia, Estabilidad y Confiabilidad

En el índice de prácticas agroecológicas, el CAFS es el más cercano al óptimo. Se encontró que 8 de 11 prácticas se clasifican como agroecológicas, estas prácticas son: deshierbes manuales, surcado con yunta, barbecho con yunta, siembra manual, cosecha manual, amogote para conservar la humedad del suelo, corte de frutales e incorporación al suelo de los residuos de las podas. El TAFS presenta un índice de 0.6, que significa que 7 de 11 prácticas realizadas se clasifican como agroecológicas, en el AAFS presenta un índice de 0.5, que significa que 5 de las 11 prácticas son consideradas como agroecológicas. Los productores de AAFS realizan la mayoría de sus actividades con tractor, a diferencia del CAFS donde usan yunta. En capulín el uso de agroquímicos es casi nulo, en tejocote y manzana se requieren mayores cantidades de estos insumos. Los tres sistemas se encuentran por debajo de óptimo (11 prácticas) en una proporción semejante, y es que el empleo de agroquímicos es necesario para el control de plagas, y la fertilización para nutrir las plantas. Aplicando los criterios de Herrera *et al.* (2017) los AAFS y TAFS se encuentran dentro de una categoría de medianamente agroecológicos, mientras que el CAFS es altamente agroecológico.

Respecto a la diversidad, los CAFS con un índice de Shannon de 1.21, se encuentran más próximos al óptimo con índice de 1.23, ya que conservan una gran variedad de especies para su consumo y venta. Los TAFS a pesar de ser considerados como tradicionales, reflejan una reducción en su diversidad (índice = 0.16) y es que no obstante a la presencia de otras especies, el productor prioriza el tejocote por ser el principal producto para su venta. En el caso de los AAFS son sistemas muy reducidos en biodiversidad (el cultivo básico y una especie frutal), obteniendo un índice de 0.06. Los sistemas MIAF tradicionales como el CAFS y el TAFS tienen como característica principal la diversidad de especies como lo muestran distintos estudios: el sistema MIAF de las regiones

Cuicateca, Mazateca y Mixe (Jiménez *et al.*, 2016); sistemas agroforestales de valles altos de Puebla (Reyes-Reyes *et al.*, 2020), comunidades Mazahuas (Pillado-Albarrán *et al.*, 2022).

El indicador de almacenamiento de carbono muestra que los AFS tradicionales son mejores, almacenando 0.68 t ha^{-1} para el caso del TAFS y 1.63 t ha^{-1} para el CAFS, sin embargo, aún son valores por debajo del óptimo encontrado en campo (1.77 t ha^{-1}). En los CAFS, los árboles son de mayor diámetro y altura, mostrando mayor cantidad de biomasa respecto al TAFS, y el AAFS almacena una cantidad de 0.45 t ha^{-1} . Cabe destacar que el número de árboles en el caso de CAFS (60 árboles de capulín en promedio por hectárea) es mucho menor que en el AAFS (200 árboles de manzana en promedio por hectárea). La importancia de los AFS radica en que proveen bienes y servicios ecosistémicos, tal como la mitigación del cambio climático al capturar carbono en biomasa (Forero *et al.*, 2018). En este sentido Pocomucha y Alegre (2014), refieren que la inclusión de árboles en las parcelas no está valorándose adecuadamente sólo en función del potencial de carbono almacenado, si no por otros beneficios adicionales como la mejora de ingresos económicos, situación que se ve reflejada en la zona de estudio.

De acuerdo con Villa *et al.* (2020) entre los principales beneficios que prestan este tipo de sistemas se incluyen la recuperación, conservación y mejora de la biodiversidad, el aumento de las reservas de carbono, la fijación biológica de nitrógeno y el ciclaje de nutrientes, la disminución de la erosión y el mantenimiento de la fertilidad del suelo.

En el acceso a créditos y seguros, la tendencia a la mayor sustentabilidad, es que no dependa o dependa mínimamente de recursos económicos externos. Ninguno de los AFS evaluados han tenido esos servicios, ya que estos están enfocados a monocultivos. Para superar este problema los productores han implementado diferentes estrategias para no acceder a préstamos y a créditos.

Adaptabilidad

El índice de apropiación de innovaciones, para los AFS tradicionales se encuentran en cero prácticas con respecto al óptimo (11 prácticas). En estos sistemas los productores tienen entre 61 y 79 años, por lo que basan sus prácticas en lo saberes, experiencia y conocimiento tradicional y son poco flexibles al cambio. Toledo (2013) señala que el conocimiento, cosmovisiones, reglas, normas, y saberes tecnológicos, son apropiados a través de un proceso determinado por las relaciones sociales establecidas, por lo que la apropiación de un elemento nuevo se vuelve complejo sobre todo para personas de mayor edad. Otro factor es la escolaridad, estos productores tienen primaria no concluida; González y Coelho (2014) mencionan que la edad del productor y escolaridad son variables que afectan en la decisión sobre la adopción de innovaciones. Sin embargo, Jiménez *et al.* (2023) señalan que las variables como edad y escolaridad están limitadas para explicar la adopción de innovaciones, porque solo funcionan en contextos concretos, por lo que ningún productor innova más de lo que sus relaciones le permiten.

Existen otros retos para la transferencia de la tecnología, como la intensidad de conocimiento tecnológico, la inversión en plántulas frutales al inicio, fuentes adecuadas de financiamiento y asistencia técnica y el acceso al mercado de fruta fresca (Turrent *et al.*, 2017), así como la indisponibilidad de insumos (principalmente fertilizantes químicos) (Ruiz *et al.*, 2012). El AAFS cuenta con innovaciones como: la disminución de la distancia entre plantas, el manejo del árbol con diferentes tipos de podas, las dosis de fertilización y la introducción de una variedad nueva de frutal en la zona (Manzana variedad Agua Nueva). La introducción de esta especie se facilitó por el apoyo recibido por los productores para adquirir la plántula; además de que las prácticas las realiza personal enviado por el asesor, por lo que algunos costos no son erogados por los productores. A pesar de ser parcelas comerciales (ya no son experimentales), el productor toma pocas decisiones sobre el manejo del frutal. De acuerdo con la escala que proponen Herrera *et al.* (2017), los AFS tradicionales son sistemas sin innovación externa, mientras que al AAFS se le considera escasamente innovador. Sobre este último, existe diferencia con lo reportado por Jiménez *et al.* (2016) para la sierra norte de Oaxaca, donde los productores si han adoptado la tecnología del sistema MIAF en ladera. De igual forma, otro estudio en la región mixe reporta que los campesinos decidieron innovar en componentes como la poda, injerto, trazos de curvas a nivel, siembra de la milpa dentro del sistema MIAF y la no quema del rastrojo, y el rechazo a otras prácticas debido a la estructura sociocultural y económica del campesino (Ruiz *et al.*, 2012). Así mismo, Ordóñez-Ovalle

et al. (2022) señalan que la principal fortaleza para que se llegué a adoptar esta innovación, es que el sistema milpa se basa en la diversificación productiva y en la asociación de cultivos maíz-frijol-calabaza.

Equidad

El índice de equipo por productor posiciona a los tres AFS en un rango muy similar presentando un índice de 0.9. La ponderación se hizo con relación al tipo de maquinaria que utilizan; presentaron mejores resultados los que basan sus prácticas en el uso de yunta y herramientas manuales, y el CAFS se encuentra más cercano al óptimo al realizar todas sus actividades con yunta. Un elemento similar para los tres AFS es que el barbecho siempre se realiza con tractor, por lo que tienen que rentar este equipo; la preparación de los surcos para la siembra se realiza con yunta, al obtener mejores resultados que con tractor.

Un indicador que presenta mayor diferencia es el grado de adoptabilidad de cada sistema. El AAFS (alternativo) ha sido adoptado por el 2.5 % de los productores, mientras que 97.5 % de los productores poseen un AFS tradicional, siendo el TAFS (tejocote) el de mayor preferencia debido a la importancia de esta especie frutal en el mercado.

Autogestión

El índice de Seguridad Alimentaria en Maíz (CIFS), resultó con un valor de 2.05 en el AAFS, más cercano al óptimo (2.5) superando a los TAFS que obtuvieron un valor de 1.45 y 1.55 para el CAFS. Los rendimientos de maíz por hectárea fueron: 4.5 t ha⁻¹ para los AAFS, 2.5 t ha⁻¹ para los TAFS y 1.45 t ha⁻¹ para los CAFS. Y la cantidad de personas dependientes del sistema es de 4 a 5 en todos los casos. El AAFS con mayor superficie para el cultivo de maíz, por disponer sólo del frutal manzana (a diferencias de los AFS tradicionales que poseen un mayor número de árboles frutales intercalados con el maíz), se refleja en los rendimientos. Sin embargo, de acuerdo a la clasificación de Damián y Toledo (2016), tanto el AFS alternativo (AAFS) como los de referencia (TAFS y CAFS) poseen seguridad alimentaria al tener valores mayores a 1.0. González *et al.* (2019) reportan que el municipio de Calpan posee en promedio un CIFS (Índice de seguridad alimentaria) de 1.44, y para el caso particular de la localidad de San Andrés Calpan un CIFS de 1.58, valores muy próximos a los que se obtuvieron en los AFS evaluados.

Con respecto a la autosuficiencia genética en maíz, los tres AFS se encuentran en el óptimo, es decir que el 100 % de sus semillas se obtienen de sus propias parcelas. López *et al.* (2019) reportan que en el municipio de Calpan se da esta práctica de manera general, la cual consiste en hacer una selección de la semilla criolla inmediatamente después de la cosecha, los campesinos seleccionan la semilla de maíz desde el granero después la cosecha, considerando el tamaño de la mazorca, tamaño de olote y forma de la semilla.

La independencia a insumos externos (uso de agroquímicos) para el manejo del maíz y de los frutales, el AAFS resultó más alejado del nivel óptimo de sustentabilidad, al ser el sistema que ocupa mayor cantidad de agroquímicos para la fertilización, y el control de plagas y enfermedades (1,259 kg ha⁻¹ año). De acuerdo con los productores de la zona, esto responde a la necesidad de contar con una buena presentación de la manzana para que pueda ser colocada a un mejor precio en el mercado; por el contrario, los AFS tradicionales resultaron con menos cantidad de agroquímicos: TAFS 1,062 kg ha⁻¹ año y CAFS 964 kg ha⁻¹ año; esto ocurre porque para la venta de los frutales no necesitan excelencia en su apariencia estética, no obstante, es importante el tamaño. En los tres casos hay una dependencia al uso de insumos químicos. Aunado a esto, se presenta otro fenómeno que también es reportado por Guzmán *et al.* (2016) quienes refieren que existe una ausencia de conocimiento técnico y capacitación en el manejo y uso de agroquímicos. González (2023) destaca a nivel nacional, la actividad agrícola se amenaza a sí misma por la sobreexplotación de la tierra y por el uso desmedido de agroquímicos, en muchos casos por la falta de un acompañamiento técnico al productor. Esta ausencia ha provocado la reproducción del conocimiento empírico del productor, el cual ha pasado de generación en generación y con ello el manejo no apropiado de estos productos químicos.

Los AFS tradicionales utilizan mayor mano de obra familiar. De los 66 jornales que ocupan para las diversas tareas durante el ciclo agrícola, 38 (58 %) provienen de la familia, en comparación al

AAFS, de 88 jornales requeridos, solo 13 (15 %) proceden de la familia. En ambos casos no se alcanza el óptimo, donde el 100 % de la mano de obra ocupada proviniera de la familia. En el caso de los AFS tradicionales, la mayor parte de sus prácticas son realizadas por miembros de la familia (hijos, esposa, hermanos, sobrinos y tíos); sin embargo, en la época de corte de los frutales, se ven en la necesidad de contratar mano de obra externa a la familia para la recolección de fruta, situación que se repite en la siembra y cosecha del maíz. Para el AAFS la familia no interviene en el frutal y se concreta a las prácticas referentes al maíz. González *et al.* (2019) mencionan que este tipo de agricultura depende de una abundante mano de obra familiar, que en muchos casos proviene de los hijos, esto es coordinado por el jefe de familia quien se encarga de distribuir las tareas de acuerdo al sexo y la edad.

Para la participación de los hijos en las actividades de la parcela, se aplicó un índice de relevo intergeneracional. Para los tres AFS el valor es bajo (menor a 25 %); es decir, son familias en promedio con 5 hijos, de los cuales sólo uno es el que continúa con el manejo del sistema agrícola, y en algunos casos, ninguno de los hijos. En los tres sistemas son los hijos mayores los que relevan la tarea de la parcela, o los que no estudiaron. Las nuevas generaciones optan por migrar a empleos fuera del campo; consideran que quedarse trabajando en el campo representa estancamiento. Este fenómeno coincide con lo encontrado por Briones -Aranda *et al.* (2024), en un sistema de policultivo se genera el 45 % de empleo familiar, lo que provoca bajo nivel de relevo intergeneracional y el abandono de la actividad agrícola principalmente de los integrantes de la familia más jóvenes. De Grammont (2016) señala que el empleo agrícola ha pasado a ser sustituido y/o complementado por actividades desempeñadas en los sectores secundarios y terciarios. En el mismo sentido Venegas *et al.* (2021) coinciden en que la pluriactividad campesina es un fenómeno asociado a la desagrarización del campo, que consiste en la disminución del aporte de las actividades agrícolas al ingreso familiar, aunado al incremento de la migración y envejecimiento del campo, lo cual se ve reflejado en la permanencia campesina.

Un indicador que refleja la importancia de las especies frutales en los AFS, es el aporte económico a la economía familiar. El AAFS representa solo un 15 % del ingreso, mientras los sistemas tradicionales basan su economía en la venta de los productos obtenidos de sus especies frutales, representando un 65 % en el caso del TAFS y un 80 % en los CAFS. Este fenómeno se debe a que los productores con AAFS no basan su economía en el sector agrícola, poseen algún tipo de oficio o comercio que es lo que sustenta su economía. Los productores de los AFS tradicionales, tienen a la agricultura como su principal actividad.

La diversificación de productos permite a los productores tener menores riesgos. Los CAFS poseen un mayor número de componentes para la venta (10), en segundo lugar, los TAFS (5), y el más alejado del óptimo es el AAFS (2). El óptimo se obtuvo de un sistema en el cual se reportaron 11 cultivos diferentes para consumo y venta, entre los que se encuentran maíz, frijol, calabaza, haba, chile, entre otros, y frutales como capulín, tejocote, pera, ciruela, durazno y nogal. Una mayor diversidad de productos en el sistema representa un bajo riesgo de una pérdida completa de la cosecha en caso de una perturbación, además de una mejor utilización del tiempo por el productor, ya que no todos los cultivos se desarrollan simultáneamente, lo que a su vez permite percibir un ingreso en diferentes épocas del año (Ebel *et al.* 2017). Esto coincide con lo que reportan Alcázar y Gómez (2022) en su investigación, refiriendo que la diversidad de cultivos, convierte la actividad agrícola más diversa y multifuncional, y provee a los campesinos varias alternativas de negocio en diversas cantidades y en diferentes temporadas del año.

Los posibles canales de comercialización son en promedio dos para los tres sistemas: el mercado local y la venta directa a intermediarios en la parcela; existe un tercero que reportaron algunos productores: mercados regionales ubicados fuera del municipio.

Tabla 1. Integración de los indicadores de sostenibilidad de los sistemas agroforestales Manzana, Tejocote y Capulín en San Andrés Calpan, Puebla.

Indicador	Criterio para el óptimo	Óptimo	AAFS	TAFS	CAFS
1. Rendimiento de cultivo básico	Información proporcionada por los investigadores del MIAF, 2019. Datos en t ha ⁻¹	6 100%	4.50 75%	2.50 42%	2.75 46%
2. Índice del rendimiento del frutal	El óptimo es considerado 1 Mejor rendimiento: Manzana 15 T (Inf. MIAF, 2019); Tejocote 7 T y Capulín 3.9 T (SIAP, 2018)	1 100 %	0.07 7 % 1.05 t ha ⁻¹	0.84 84 % 5.9 t ha ⁻¹	0.78 78 % 3.05 t ha ⁻¹
3. Eficiencia relativa de la tierra	De acuerdo con Cortés and Turrent, 2018	1.3 100 %	0.79 53 %	1.26 84 %	1.24 82 %
4. Relación Beneficio/Costo (R B/C)	Se consideró el valor más alto con datos de campo R B/C = 1:3	3 100 %	1.56 52 %	2.32 77 %	2.13 71 %
5. Índice de Prácticas Agroecológicas	Valor máximo posible. La relación es en función a las 11 prácticas registradas	1 100 %	0.60 60 %	0.60 60 %	0.75 75 %
6. Diversidad biológica vegetal	Valor máximo encontrado en campo	1.23 100 %	0.06 5 %	0.16 13 %	1.21 98 %
7. Captura de carbono	Valor máximo encontrado en campo	1.77 100 %	0.45 25 %	0.68 38 %	1.63 92 %
8. Acceso a créditos y seguros	Valor máximo posible	0 100 %	0 100 %	0 100 %	0 100 %
9. Índice de apropiación de innovaciones tecnológicas	Valor máximo posible. La relación en función a las 11 prácticas registradas	1 100 %	0.09 9 %	0 0 %	0 0 %
10. Índice de equipo por productor	Valor máximo posible	1 100 %	0.9 90 %	0.9 90 %	0.95 95 %
11. Grado de adoptabilidad	Valor máximo posible	100%	2.5%	65%	32.5 %
12. Índice de seguridad alimentaria	Valor máximo encontrado en campo	2.5 100 %	2.05 82 %	1.45 58 %	1.55 62 %
13. Autosuficiencia genética	Valor máximo posible	100 100 %	100 100 %	100 100 %	100 100 %
14. Independencia a insumos externos	Valor máximo posible	0 100 %	1259 0 %	1062 16 %	964 23%
15. Mano de obra	Valor máximo posible	100 100 %	16 16 %	58 58 %	58 58 %
16. Índice de relevo intergeneracional	Valor máximo posible	1 100 %	0.10 10 %	0.20 20 %	0.13 13 %
17. Ingresos del AFS a la unidad familiar	Valor máximo posible	100 100 %	15 15 %	65 65 %	80 80 %
18. Diversidad de la venta	Valor máximo encontrado en campo	11 100 %	2 18 %	5 45 %	10 91 %
19. Canales de comercialización	Valor máximo encontrado en campo	3 100 %	2 67 %	2 67 %	2 67 %

Nota: Los valores presentados en la tabla, para el caso de algunos indicadores no representan el dato directo, es decir, se establecieron rangos, o porcentajes inversos para poder asignar un valor que representara lo que se desea con respecto a niveles de sustentabilidad. Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Finalmente, para comparar integralmente los sistemas evaluados, se eligió una representación tipo Amiba (Figura 2), que muestra de forma gráfica los resultados de los indicadores. La evaluación del estado de sustentabilidad de los AFS permite ver que los sistemas tradicionales son los que tienen un mayor estado de sustentabilidad con un porcentaje de 66 % para el CAFS y 61 % para el TAFS, en relación al sistema alternativo (AAFS) con un valor de 45 %. Los resultados son semejantes a los encontrados por Ordóñez-Ovalle *et al.* (2022) para un sistema MIAF en una comunidad de Chamula en Chiapas, que resultó con un índice de sustentabilidad de 6.47.

Económicamente y ecológicamente el CAFS obtuvo los mejores valores, en segundo lugar, se encuentra el TAFS, siendo superior únicamente en la parte social en un 4 % con respecto al CAFS.

El AAFS obtuvo únicamente el valor más alto en 2 indicadores; rendimiento del cultivo básico y en el índice de seguridad alimentaria. Indicadores como acceso a créditos y seguros, autosuficiencia genética y canales de comercialización tienen el mismo comportamiento en los tres sistemas.

Los AFS tradicionales tienen un grado de adoptabilidad mayor que el alternativo. Los productores que tienen los AAFS, han señalado que no se sienten completamente identificados ni seguros de este sistema, por lo que su escalamiento ha sido limitado; sin embargo, han accedido a implementarlo por la asesoría que reciben y el apoyo en los costos del manejo del frutal. El AAFS representa una segunda opción para los productores que lo han adoptado, ya que su fuente principal de ingresos deriva de algún comercio o de otro AFS con características tradicionales.

Un estudio sobre multifuncionalidad de la agricultura familiar campesina realizado por Blanca *et al.* (2024) en el municipio de Calpan, Puebla, encuentran que este tipo de agricultura (con estructura de los AFS tradicionales), “continúa generando diversas funciones, entre las de mayor presencia se encuentran: conservación de saberes, conservación de biodiversidad agrícola, prácticas agroecológicas, seguridad alimentaria, generación de empleos, configuración del paisaje y arraigo territorial. Destacan el ámbito ambiental como prácticas agroecológicas y conservación de la agrobiodiversidad, y las del ámbito territorial la configuración del paisaje”. Con un Índice de Multifuncionalidad de la Agricultura Campesina (IMPA) de 72.61 de multifuncionalidad (media alta), este tipo de agricultura se mantiene en un nivel medio alto de sustentabilidad como lo muestran los resultados.

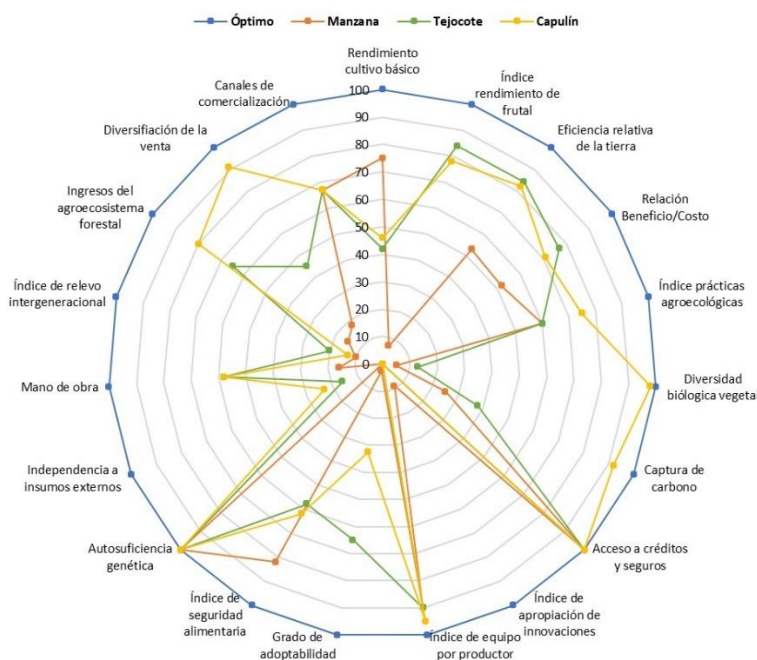


Figura 2. Estado de sustentabilidad de los Sistemas Agroforestales: Manzana, Tejocote y Capulín, en San Andrés Calpan, Puebla. Fuente: Elaboración propia con información de campo.

Conclusiones

Los AFS tradicionales resultaron con un porcentaje de sustentabilidad más alto: el AFS de capulín 66 % y el AFS de tejocote 61 %, mientras el AFS de manzano resultó con 45 %, por lo que los AFS tradicionales son más sustentables y cumplen diversos objetivos de la unidad de producción familiar, entre los más importantes, mayor diversidad de alimentos para el autoconsumo y diversificación de ingresos durante diferentes épocas del año.

Los tres agroecosistemas campesinos evaluados (AAFS, TAFS y CAFS), tienen algunas características similares en la dimensión social: canales de comercialización, acceso a créditos y seguros y equipo por productor, pero presentan más diferencias en aspectos tecnológicos y de manejo de las prácticas, mostrando contraste tanto en la diversidad biológica vegetal, la productividad y en la rentabilidad.

Por lo anterior, los productores optan por sistemas con especies predominantes de la zona como el capulín y el tejocote, y sistemas con mayor diversidad de frutales, a diferencia del AFS de manzano, con una sola especie de frutal.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; desarrollo de la metodología, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; manejo de software, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; validación experimental, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I., Ramírez-Valverde B.; análisis de resultados, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; Manejo de datos, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; escritura y preparación del manuscrito, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; redacción, revisión y edición, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I., Ramírez-Valverde B.; Ortiz-Torres E.; Sánchez-Morales P.; Acosta-Mireles M.; administrador de proyectos, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.; adquisición de fondos, Reyes-Reyes A. K., Ocampo-Fletes I.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Esta investigación fue financiada por el Colegio de Postgraduados a través del Apoyo a Estudiantes y con fondos propios.

Declaración de consentimiento informado

Se obtuvo el consentimiento informado de todos los sujetos involucrados en el estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CONAHCYT por el financiamiento de beca a la primera autora. A los productores de San Andrés Calpan, por la disposición a participar en este estudio, proporcionando información sobre los sistemas agroforestales. Así como a los seis productores que permitieron el seguimiento de actividades en sus parcelas.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Albino, G. R., Turrent, F. A., Cortés, F. J. I., Livera, M. M., & Mendoza, C. M. C. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513-531.

- Alcázar-Sánchez, J. G., & Gómez-Martínez, E. (2022). Diversidad agroalimentaria: estrategias de reproducción campesina en economías de autosubsistencia en Los Altos de Chiapas, México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 32(59). <https://doi.org/10.24836/es.v32i59.1184>
- Altieri, M. A., Funes, F., Henao, A., Nicholls, C., & Zuluaga, G. (2012). Hacia una metodología para la identificación, diagnóstico y sistematización de sistemas agrícolas resilientes a eventos climáticos extremos. Documento de trabajo. Red Iberoamericana de Agroecología Para el Desarrollo de Sistemas Agrícolas Resilientes al Cambio Climático. 21p.
- Altieri, M. A., & Koohafkan, P. (2008). Enduring farms: climate change, smallholders and traditional farming communities (Vol. 6). Penang: Third World Network (TWN).
- Altieri, M., & Nicholls, C. I. (2000). Agroecología: Teoría y práctica para una agricultura sustentable. Serie Textos Básicos para la Formación Ambiental. PNUMA. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México, 235.
- Arévalo, L., Alegre J. & Palm, CH. (2003). Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú. Publicación de STC CGIAR Ministerio de Agricultura. Pucallpa, Perú, Miguel Álvarez. 24 p.
- Blanca-Bautista, M., Ocampo-Fletes, I., Juárez-Sánchez, J. P., Herrera-Cabrera, B. H., Pérez-Ramírez, E., & Sánchez-Morales, P. (2024). Índice de multifuncionalidad de la agricultura familiar campesina (IMAF): Caso municipio de Calpan, Puebla. *Revista de Geografía Norte Grande*, 87, 1-24. <https://revistanortegrande.uc.cl/index.php/RGNG/index>
- Briones-Aranda, D. P., Sánchez-Morales, P., Ocampo-Fletes, I., Romero-Arenas, O., & Acosta-Mireles, M. (2024). Sustentabilidad del agroecosistema maíz en dos formas de manejo campesino en Chignautla, Puebla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(2), 1-21.
- Conway, G. R. (1985). Agroecosystem analysis. *Agricultural Administration*. [https://doi.org/10.1016/0309-586X\(85\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0309-586X(85)90064-0)
- Cortés, F. J., & Turrent, F. A. (2018). MIAF: Una Tecnología Multiobjetivo Sustentable para la Agricultura Tradicional. En J. Calva, Soberanía Alimentaria y Desarrollo del Campo. 1ra ed., p. 199. México: Juan Pablos
- Cortés, J. I., Turrent, A., Díaz, P., Hernández, E., Mendoza, R. & Aceves, E. (2005). Manual para el establecimiento y manejo del Sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en laderas. Colegio de Posgraduados, México.
- Damián, H. M. & Toledo, V. M. (2016). Utopística Agroecológicas Innovaciones Campesinas y Seguridad Alimentaria en Maíz. BUAP. Dirección de Fomento Editorial. P. 125.
- De Grammont, H. C. (2016). Hacia una ruralidad fragmentada: La desagrarización del campo mexicano. *Nueva sociedad*, (262), 1-11.
- DeClerck, F. A., Jones, S. K., Attwood, S., Bossio, D., Givret, E., Chaplin-Kramer, B. & Noriega, I. L. (2016). Agricultural ecosystems and their services: the vanguard of sustainability?. *Current opinion in environmental sustainability*, 23, 92-99. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.016>
- Ebel, R., Pozas, C. J., Soria, M. F. & Cruz, G. J (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 149-160.
- Farrell, J. G., & Altieri, M. A. (1997). Sistemas agroforestales. Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable. La Habana Cuba: Consorcio Latinoamericano sobre Agroecología y Desarrollo.
- Fonseca-Carreño, N. E. F., Merchan, J. D. S., & Baquero, Z. Y. V. (2019). La agricultura familiar agroecológica, una estrategia de desarrollo rural incluyente. Una revisión. *Temas agrarios*, 24(2), 96-107. <https://doi.org/10.21897/ta.v24i2.1356>
- Forero, S. P., Santos, L. N. S., Castañeda, H. J. A., & Madrigal, M. A. S. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 9(2), 121-134.
- García, D. A. T. (2020). Diversidad edáfica y relaciones productivas de la milpa intercalada con árboles frutales en la región de Huejotzingo, Puebla (Doctoral dissertation).
- Gliessman, S. R. (2002). Agroecología. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 359 p.
- González, O. M. (2023). Las codependencias de la agroindustria en Sinaloa, México. *Perfiles latinoamericanos: revista de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Sede México*, 31(61), 1.
- González, S. R. & Coelho, S. G. (2014). Agricultura familiar: mercantilización y su repercusión en la seguridad alimentaria y nutricional familiar. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, (24), 95-116.
- González, J. L. L., Gaxiola, J. F. Á., Miguez, S. E. R., Huato, M. Á. D., Espinosa, J. A. M., & Sánchez, J. A. P. (2019). Huertos familiares y seguridad alimentaria: el caso del municipio de Calpan, Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 16(3), 351-371.
- Guzmán, P. P., Guevara, G. R. D., Olgún, L. J. L. & Mancilla, V. O. R. (2016). Perspectiva campesina, intoxicaciones por plaguicidas y uso de agroquímicos. *Idesia (Arica)*, 34(3), 69-80. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000300009>
- Herrera, F., Velasco, C., Denen, H., & Radulovich, R. (1994). Fundamentos de análisis económico: guía para investigación y extensión rural. Serie Técnica, Informe Técnico No. 228; CATIE. Turrialba, Costa Rica. 62 p.
- Herrera, P. L., Valtierra, P. E., Ocampo, F. I., Tornero, C. M. A., Hernández, P. J. A., & Rodríguez, M. R. (2017). Prácticas agroecológicas en Agave tequilana Weber bajo dos sistemas de cultivo en Tequila, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(18), 3711-3724. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i18.216>
- Hernández, M. R. (2022). El arreglo topológico, la labranza y el acolchado para intensificar el sistema MIAF maíz-frijol-árboles de guayaba en un vertisol (Doctoral dissertation). Colegio de Posgraduados. Texcoco, México
- Hernández, S., A., & Alcaraz, V. V. (2020). Capacidades adaptativas y panorama de la agricultura campesina en Michoacán desde la producción de maíz de temporal. En: Factores críticos y estratégicos en la interacción territorial desafíos actuales y escenarios futuros. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, Coeditores.

- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática [INEGI]. (2015). México en cifras. Información nacional, por entidad federativa y municipios. <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=21>
- Jiménez, C. S. J., Medel, R. R., José, J. D., & Salazar, C. M. S. (2023). Nadie innova más de lo que sus relaciones le permiten: El caso de pequeños productores. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(3), 8.
- Jiménez, S. L.; León, M. A., & Hernández, J. M. (2016). La agricultura mexicana y su potencial en la alimentación: El contexto actual. In: Martínez-Carrera, D. y Ramírez-Juárez J. (Eds.). Ciencia, tecnología e innovación en el sistema agroalimentario de México. Editorial del Colegio de Postgraduados-AMC-CONACYT-UPAEP-IMINAP. San Luis Huexotla, Texcoco, Estado de México. 3-26.
- López, G. J., Damián, H. M., Álvarez, G. J., Méndez, E., J., Rappo, M. S., & Paredes, S. J. (2019). Innovaciones radicales y progresivas en el manejo del maíz en Calpan, Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2), 277-288. <https://dx.doi.org/10.29312/remexca.v10i2.802>
- Lozano, G. M. A., Valle, G. S., Aguirre, M. E., Lobato, C. C. S., & Huelitl, P. F. (2016). Películas basadas en emulsiones de pectina de frutos de tejocote (*Crataegus spp.*) y cera de candelilla: caracterización y aplicación en *Pleurotus ostreatus*. *Agrociencia*, 50(7), 849-866.
- Masera, O., Astier, M., & López, R. S. (1999). Marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad MESMIS. Mundiprensa – GIRA – UNAM. México.
- Navia, E. J. F. (2017). La Agroforestería frente al Cambio Climático. *FAGROPEC-Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 9(2), 51-56.
- Ordóñez-Ovalle, J., Gómez-Martínez, E., Soto-Pinto, L., & González Santiago, M. V. (2022). El sistema milpa intercalado con árboles frutales (MIAF): evaluación agroecológica a diez años de su implementación en Chamula, Chiapas, México. *Campo-Territorio: Revista de Geografía Agraria*, 17(48), 109-136.
- Pillado-Albarrán, K. V., Albino-Garduño, R., Santiago-Mejía, H. & Pedraza-Mandujano, J. (2022). Elementos bioculturales, base para la adaptación del sistema MIAF en la zona mazahua del estado de México. *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 32(60), 2-33. <https://doi.org/10.24836/es.v32i60.1247e221247>
- Pocomucha, V., & Alegre, J. (2014). La interacción de carbono almacenado en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao L.*) en Huánuco, Perú. *RevIA*, 3(1).
- Regalado-López, J., Castellanos-Alanis, A., Pérez-Ramírez, N., Méndez-Espinoza, J. A., & Hernández-Romero, E. (2020). Modelo asociativo y de organización para transferir la tecnología milpa intercalada en árboles frutales (MIAF). *Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 30(56). <https://doi.org/10.24836/es.v30i56.983>
- Reyes-Reyes, A. K, Ocampo-Fletes, I, Ramírez-Valverde, B, Ortiz-Torres, E., Sánchez-Morales, P., & Acosta-Mireles, M. (2020). Campesinidad y agroindustrialidad de los sistemas agroforestales de San Andrés Calpan, Puebla. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(3), 1-13. <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3203>
- Robles, M. V., Ronquillo-de Jesús, E., Quiroz-Reyes, C. N., & Aguilar-Méndez, M. A. (2020). Caracterización e identificación de compuestos bioactivos con actividad antioxidante de la cáscara, pulpa y semilla del fruto de tejocote (*Crataegus mexicana*). *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 23. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2020.0.233>
- Ruiz, M. A. D., Jiménez, S. L., Figueroa R. L. O., & Morales, G. M. (2012). Adopción del sistema milpa intercalada en árboles frutales por cinco municipios mixes del estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8), 1605-1621.
- Saavedra, M. E. (2015). Metodologías para la obtención de indicadores de sustentabilidad agroecológica en vifedros orgánicos. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.
- La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural [SADER]. (2018). Listado de Beneficiarios PROAGRO ciclo primavera-verano 2018. <http://www.agricultura.gob.mx/listado-de-beneficiarios/ciclo-primavera-verano-2018>
- Sarandón, S. J., & Flores, C. C. (2009). Evaluación de la sustentabilidad en agroecosistemas: una propuesta metodológica. *Agroecología*, 4, 19-28.
- Sauvenier, X., Valckx, J., Van Cauwenbergh, N., Wauters, E., Bachev, H., Biala, K., & Bielders. (2006). Framework for Assessing Sustainability Levels in Belgian Agricultural Systems - SAFE. Part 1: Sustainable Production and Consumption Patterns. Belgian Science Policy, Brussels.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2018). Datos abiertos. http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos_a.php
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2023). Cierre de producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Smyth, A., & Dumanski, J. (1993). FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. *World Soil Resources Report*, 73. Land and Water
- Toledo, M. V. (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socio-ecológica. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*. 34(136):41-71.
- Toledo, M. V., Alarcón, C. P., & Barón, L. (1999). Estudiar lo rural desde una perspectiva interdisciplinaria: una aproximación al caso de México. *Estudios agrarios*, 12, 55-90.
- Tonolli, A., Greco, S., & Sarandón, S. J. (2019). Algunos aspectos emergentes y de importancia para la construcción del enfoque agroecológico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 51(1), 205-212.
- Torres, A. A., Vásquez, G. G., Piedrahita, D. C., & Vásquez, V. S. (2019). Evaluación y planificación de sistemas agroforestales sustentables de cacao (*Theobroma cacao L.*) y bambú (*Guadua angustifolia K.*), Montalvo, Ecuador. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*. ISSN 2528-8083, 4(4), 10-21. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3473533>
- Turrent, F. J., Albino, G. R., Cortés, F. J. I., Livera, M. M., & Mendoza, C. M. C. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5),513-531.

- Turrent, F. A., Cortés, F. J. I., Espinosa, C. A., Hernández, R. H., Camas, G. R., Torres, Z. J. P. & Zambada, M. A. (2017). MasAgro o MIAF ¿Cuál es la opción para modernizar sustentablemente la agricultura tradicional de México? *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(5), 1169-1185. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.116>
- Van Cauwenbergh, N., Biala, K., Bielders, C., Brouckaert, V., & Franchois, L. (2007). SAFE - A hierarchical framework for assessing the sustainability of agricultural systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 120(2-4), 229-242.
- Vásquez, G. A., Matus, G. J. A., Cetina, A. V. M., Sangerman, J. D. M., Rendón, S. G., & Caamal, C. I. (2017). Análisis de rentabilidad de una empresa integradora de aprovechamiento de madera de pino. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(3), 649-659. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.38>
- Venegas Sandoval, A., Soto Pinto, L., Álvarez Gordillo, G., Alayón Gamboa, A., & Díaz-Nigenda, E. (2021). La diversificación de estrategias socioambientales en la familia campesina: mecanismo de resiliencia ante la crisis del café en Chiapas. *Revista Pueblos y fronteras digital*, 16. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2021.v16.510>.
- Villa, P.M., Martins, S.V., de Oliveira Neto, S.N., Rodrigues, A.C., Hernández, E.P., & Kim, D.G. (2020). Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. *Forest Policy and Economics*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102217>

ARTÍCULO EN PRENSA