



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DOCTORADO EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE**

**Propuesta metodológica de evaluación de la multifuncionalidad
del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF)**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Presenta:

Idalia Zaragoza Hernández

Bajo la supervisión de: Dr. José Luis Romo Lozano



Chapingo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2025

PROPUESTA METODOLÓGICA DE EVALUACIÓN DE LA
MULTIFUNCIONALIDAD DEL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON
ÁRBOLES FRUTALES (MIAF)

Tesis realizada por **IDALIA ZARAGOZA HERNÁNDEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS EN AGRICULTURA MULTIFUNCIONAL PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

DIRECTOR:  _____

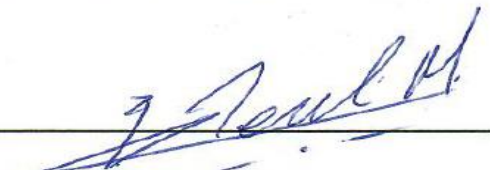
Dr. José Luis Romo Lozano

ASESOR:  _____

Dr. Eduardo Valdés Velarde

ASESOR:  _____

Dr. Rufo Sánchez Hernández

LECTOR EXTERNO:  _____

Dr. Roberto Rendón Medel

CONTENIDO

Lista de cuadros.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de apéndices	viii
Dedicatoria.....	ix
Agradecimientos	x
Datos biográficos	xi
Resumen general.....	xii
Abstract.....	xiv
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Justificación	3
1.3. Objetivos	5
1.4. Hipótesis.....	5
1.5. Literatura citada	6
Capítulo 2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Marco contextual	9
2.2. Marco conceptual.....	10
2.3. Marco metodológico	11
2.4. Contenido temático.....	13
2.5. Literatura citada	14
Capítulo 3. TENDENCIAS Y TEMÁTICAS EN LA EVALUACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD DE AGROECOSISTEMAS: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO	18
3.1. Summary.....	18
3.2. Resumen	19
3.3. Introducción	20
3.4. Materiales y métodos.....	22

3.5. Resultados y discusión.....	24
3.5.1. Análisis para cada clúster.....	27
3.6. Conclusiones.....	32
3.7. Literatura citada	33
Capítulo 4. INTERPRETACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD EN LA EVALUACIÓN DE AGROECOSISTEMAS	40
4.1. Resumen	40
4.2. Abstract	40
4.3. Introducción	41
4.4. Metodología	43
4.5. Resultados y discusión.....	44
4.5.1. Interpretación de multifuncionalidad de agroecosistemas	46
4.5.2. Evaluación de la multifuncionalidad de agroecosistemas.....	51
4.5.3. Consideraciones en la evaluación de la MF de agroecosistemas.....	58
4.5.4. Limitaciones del estudio y futuras investigaciones	59
4.6. Conclusiones.....	60
4.7. Literatura citada	61
Capítulo 5. SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES: TEMÁTICAS Y RESULTADOS DE SUS PRINCIPALES OBJETIVOS DE DISEÑO	66
5.1. Resumen	66
5.2. Abstract	67
5.3. Introducción	67
5.4. Materiales y métodos.....	69
5.5. Resultados y discusión.....	69
5.5.1. Categorías temáticas de investigación sobre el sistema MIAF.....	70
5.5.2. Análisis de avances de investigación en función de los propósitos del sistema MIAF.....	79
5.6. Conclusiones.....	81

5.7. Literatura citada	83
Capítulo 6. EVALUACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD DEL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES. UNA PROPUESTA BASADA EN MÉTODOS DE ANÁLISIS MULTICRITERIO	88
6.1. Resumen	88
6.2. Abstract	89
6.3. Introducción	89
6.4. Materiales y métodos.....	92
6.4.1. Estrategia metodológica	92
6.4.2. Descripción de los sistemas objeto de análisis para la ejemplificación	98
6.4.3. Información base para la aplicación de los MCDA	101
6.5. Resultados y discusión.....	105
6.5.1. Aplicación del método Suma Ponderada	106
6.5.2. Aplicación del método TOPSIS.....	107
6.5.3. Aplicación del método PROMETHEE.....	107
6.5.4. Interpretación del ranking o posicionamiento de los sistemas de producción	109
6.5.5. Aspectos más relevantes entre los tres MCDA.....	110
6.5.6. Análisis del funcionamiento de los indicadores definidos	113
6.6. Conclusiones.....	116
6.7. Literatura citada	117

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Proceso depuración en la búsqueda de artículos sobre el tema de investigación.	23
Cuadro 2. Las 10 publicaciones más citadas.....	25
Cuadro 3. Interpretación de MF de agroecosistemas.	47
Cuadro 4. Variables e indicadores utilizados en la evaluación de la MF de agroecosistemas.....	54
Cuadro 5. Información de los indicadores propuestos para la evaluación del sistema MIAF.	97
Cuadro 6. Descripción de los sistemas de producción analizados para ejemplificar la aplicación de los MCDA.	99
Cuadro 7. Desempeño de cada alternativa (sistema) para cada criterio.	101
Cuadro 8. Sentido, pesos, funciones de preferencia y umbrales de cada criterio.	103
Cuadro 9. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante Suma Ponderada.	106
Cuadro 10. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante TOPSIS.	107
Cuadro 11. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante PROMETHEE.	108
Cuadro 12. Comparativo de ranking entre MCDA y escenarios de ponderación.	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las publicaciones y las citaciones en el periodo 2008-2023.....	24
Figura 2. Tendencia de los términos utilizados en la evaluación de la MF de agroecosistemas.....	27
Figura 3. Mapa bibliométrico sobre evaluación de la MF de agroecosistemas.	28
Figura 4. Indicadores más frecuentes en la evaluación de la MF de agroecosistemas.....	54
Figura 5. Marco sintetizado de la evaluación de la MF del sistema MIAF.	105

LISTA DE APÉNDICES

Apéndice 1. Ecuaciones alométricas para estimar la captura de CO ₂ eq.	121
Apéndice 2. Ranking, puntuación total y para cada criterio de los sistemas analizados con el método TOPSIS.	121
Apéndice 3. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 10% para cada criterio.	122
Apéndice 4. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 10% para cada criterio.	122
Apéndice 5. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 50%S-50%A.	123
Apéndice 6. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 50%S-50%A.	123
Apéndice 7. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 60%S-40%A.	123
Apéndice 8. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 60%S-40%A.	124
Apéndice 9. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 40%S-60%A.	124
Apéndice 10. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 40%S-60%A.	124

DEDICATORIA

A mi madre y a mi padre, por su apoyo incondicional y por legarme, con su ejemplo, la perseverancia, la autodisciplina, la curiosidad y la pasión por aprender, cualidades que fueron esenciales para llegar hasta aquí.

A mis hermanos, por la confianza que siempre me han brindado y por el reconocimiento que sé acompaña cada paso que doy. En cada meta alcanzada llevo conmigo la fuerza y el respaldo de nuestra fraternidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por haberme brindado una formación profesional sólida que ahora culmina en el grado doctoral sustentado en esta investigación.

Al Dr. José Luis Romo Lozano, por su valiosa orientación, sus consejos y el respaldo constante que hicieron posible la realización de este trabajo.

Al Dr. Eduardo Valdés Velarde, por su apoyo siempre amable y por los ánimos que me impulsaron a desarrollar diversas habilidades a lo largo de este proceso.

Al Dr. Rufo Sánchez Hernández, por su atenta disposición y seguimiento en las distintas etapas de mi formación académica.

A las personas propietarias de los sistemas de producción MIAF y otros agroforestales y sus familias que proporcionaron información para realizar los ejercicios de evaluación.

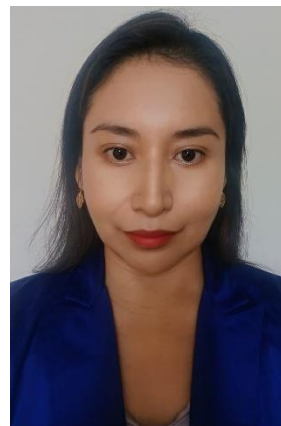
A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), antes el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada.

A la comunidad del Programa del Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible y amistades involucradas en la academia e investigación que me acompañaron en actividades de campo e hicieron sugerencias para el desarrollo de esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Idalia Zaragoza Hernández
Fecha de nacimiento: 06 de octubre de 1984
Lugar de nacimiento: Jonotla, Puebla
CURP: ZAH1841006MPLRRD05
Profesión: Ingeniero Forestal Industrial
Cédula de Licenciatura: 6314210
Cédula de Maestría 8127195



Desarrollo académico

Medio superior: Preparatoria Renacimiento de Ayotoxco de Guerrero, Puebla.
Licenciatura: División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
Maestría: Programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN GENERAL

PROPUESTA METODOLÓGICA DE EVALUACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD DEL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES (MIAF)¹

La Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una tecnología agroforestal concebida con cuatro propósitos fundamentales que la alinean al carácter multifuncional de la agricultura. Aunque diversas investigaciones han documentado resultados positivos de esta tecnología, especialmente en el rendimiento de cultivos y en la mejora de las características edáficas, su evaluación integral sigue siendo un reto debido a la complejidad de los diferentes servicios ecosistémicos que ofrece. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo desarrollar una metodología para evaluar la multifuncionalidad del sistema MIAF, basada en Métodos de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones (MCDA). La propuesta vincula los objetivos del sistema con indicadores sociales y ambientales, integrando criterios cualitativos y cuantitativos cuya importancia relativa se balancea mediante esquemas de ponderación. Los MCDA aplicados fueron suma ponderada, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). Bajo la premisa de una evaluación integral y equilibrada entre la dimensión social y la ambiental, se probaron cuatro escenarios de ponderación. La aplicación de la metodología con datos de sistemas MIAF y otros agroforestales circundantes permitió identificar indicadores clave que influyen significativamente en los resultados, como las prácticas de conservación de suelo y agua, la captura de

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Idalia Zaragoza Hernández
Director de tesis: Dr. José Luis Romo Lozano

CO₂ equivalente y la presencia de especies con valor cultural. Asimismo, el ejercicio permitió detectar oportunidades de mejora metodológica, como la necesidad de desagregar ciertos indicadores, incorporar subcriterios y ajustar funciones de preferencia. Los resultados destacan la flexibilidad y utilidad de los métodos multicriterio para valorar agroecosistemas complejos. En conjunto, la propuesta metodológica representa una herramienta valiosa para apoyar procesos de toma de decisiones en contextos diversos.

Palabras clave: multifuncionalidad de la agricultura; servicios ecosistémicos; evaluación integral; indicadores sociales y ambientales; análisis multicriterio para la toma de decisiones (MCDA).

ABSTRACT

METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR ASSESSING THE MULTIFUNCTIONALITY OF THE MILPA INTERCROPPED WITH FRUIT TREES (MIFT) SYSTEM²

The Milpa Intercropped with Fruit Trees (MIFT) system is an agroforestry technology designed with four core purposes that align it with the multifunctional character of agriculture. Although several studies have documented positive outcomes of this system, particularly regarding crop yields and improvements in soil characteristics, its comprehensive evaluation remains a challenge due to the complexity of the multiple ecosystem services it provides. In this context, the objective of the present research was to develop a methodology to assess the multifunctionality of the MIFT system, based on Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods. The proposed framework links the system's objectives to social and environmental indicators, integrating qualitative and quantitative criteria whose relative importance is balanced through weighting schemes. The applied MCDA methods included weighted sum, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), and PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). Under the premise of a balanced and comprehensive evaluation across social and environmental dimensions, four weighting scenarios were tested. Applying the methodology to data from MIFT and other surrounding agroforestry systems allowed the identification of key indicators with significant influence on the results, such as soil

² Thesis of Doctor in Science in Multifunctional Agriculture for Sustainable Development, Universidad Autónoma Chapingo
Author: Idalia Zaragoza Hernández
Advisor: Dr. José Luis Romo Lozano

and water conservation practices, CO₂-equivalent capture, and the presence of species with cultural value. Moreover, the exercise revealed opportunities for methodological improvement, such as the need to disaggregate certain indicators, incorporate sub-criteria, and adjust preference functions. The results highlight the flexibility and usefulness of multi-criteria methods for assessing complex agroecosystems. Overall, the proposed methodology represents a valuable tool to support decision-making processes in diverse contexts.

Keywords: agricultural multifunctionality; ecosystem services; comprehensive assessment; social and environmental indicators; Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Ante el contexto de fenómenos globales como la migración, la urbanización descontrolada, el cambio climático, entre otros, que ejercen presión sobre los sistemas agroalimentarios (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2024), se reconoce que la agroforestería promueve sistemas productivos con múltiples funciones que, además de generar alimentos ofrecen diversos servicios ecosistémicos (Nair et al., 2021).

En el caso mexicano, la agroforestería representa una herencia cultural con expresiones diversas, como los huertos familiares, los sistemas agrosilvopastoriles o diferentes sistemas tradicionales que incorporan especies perennes (Moreno-Calles et al., 2016). Uno de los sistemas más representativos en zonas de ladera es la Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), una tecnología agroforestal que combina cultivos anuales (como maíz y frijol) con árboles frutales, y que ha demostrado beneficios ambientales y sociales (Turrent Fernández et al., 2017).

1.1. Antecedentes

Entre los estudios realizados sobre MIAF, se encuentra el estudio de López Gaytán et al. (2008), quienes a través de cuestionarios a productores documentaron que el rendimiento de maíz incrementó de 0.7 a 1.2 t ha⁻¹ y generó ingresos por la venta de 2.5 t ha⁻¹ de durazno a partir del cuarto año al décimo quinto año; además de generar 50 jornales ha⁻¹.

Albino-Garduño et al. (2015) indicaron que el mayor rendimiento de maíz se presentó cuando se intercaló (maíz-frijol-maíz-frijol), esto debido a que las raíces presentan una mayor área de exploración (7861 cm²) y lateral (186 cm²). En el arreglo maíz-maíz el rendimiento del grano de maíz es menor respecto al cultivo intercalado, debido a que recibe la menor tasa de radiación fotosintéticamente activa transmitida al nivel del suelo y las raíces presentan menos exploración lateral. También registraron que la eficiencia relativa de la tierra fue 1.12 en el sistema maíz-maíz-frijol-frijol y 1.07 en maíz-frijol-maíz-frijol.

Por su parte, Camas Gómez et al. (2012) evaluaron los escurrimientos, producción de sedimentos y pérdidas de N y P en los sistemas: maíz en labranza de conservación (MLC); maíz en barreras de muro vivo (MBMV) y milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). Los coeficientes de escurrimiento y la degradación específica de suelo fueron similares en los sistemas MIAF (0.12, 5.8 t ha⁻¹) y MBMV (0.13, 6.3 t ha⁻¹) comparado con MLC (0.19, 16.8 t ha⁻¹), respectivamente. En los sistemas con muros de barreras vivas y frutales los coeficientes de escurrimientos y las pérdidas de suelo fueron menores que en el MLC. En cuanto a los nutrientes, se determinó una mayor pérdida de nitratos en el sistema MBMV, posiblemente debido al aporte de N por los residuos de la poda de *Gliricidia sepium*. Respecto al P, el sistema MIAF presentó una pérdida mayor, atribuyéndose a la fertilización fosfórica anual que se realizó a los árboles de guayaba durante tres años.

Aunque los objetivos de los estudios más frecuentes son los relacionados con el rendimiento (Hernández-Escobar et al., 2024; Muñoz-Ruiz et al., 2024), las características físicas, químicas o biológicas del suelo (Romero-Figueiras et al., 2024; Torres Zambrano et al., 2021), así como temas asociados a la formación de capital humano y social (Ortiz-Jiménez et al., 2023; Pillado Albarrán et al., 2023), también se encontró una investigación con un enfoque más amplio basado en una evaluación agroecológica de sistemas MIAF después de 10 años de establecimiento (Ordoñez-Ovalle et al., 2022). Esta última se considera un avance en los enfoques para analizar el sistema MIAF desde distintas dimensiones que hasta la fecha se ha reportado en la literatura científica.

1.2. Justificación

Una forma de comprender el funcionamiento y buscar áreas de mejora de los agroecosistemas, como el sistema MIAF, es mediante su evaluación. Ésta implica el análisis y la valoración de diversos aspectos relacionados con el sistema, así como sus efectos sociales y ambientales. En ese sentido, la evaluación de la MF de los agroecosistemas es esencial para una gestión más informada y sostenible de la agricultura. Permite reconocer y valorar todas las

funciones que estos sistemas desempeñan en la sociedad y el ambiente, lo que a su vez contribuye a la toma de decisiones más informadas y sostenibles en el ámbito agrícola.

No obstante, la evaluación de multifuncionalidad plantea problemas de alta complejidad para considerar todos o la mayoría de los factores que intervienen (Tzuk et al., 2020). Una forma de simplificar un análisis de tales características es utilizar indicadores. Sin embargo, la identificación e integración de estos también es un desafío importante, de manera que se necesitan procesos transparentes y sistemáticos de selección de indicadores que consideren la relevancia de estos para las partes interesadas (Liberati et al., 2020; Montenero et al., 2021).

En particular, sobre el sistema MIAF existe evidencia científica sobre los beneficios o servicios que ofrece, de acuerdo con los diversos estudios realizados desde sus inicios (Turrent Fernández et al., 2017). Los resultados de esta tecnología han destacado, sobre todo en comparación con la agricultura convencional, en diferentes áreas de estudio, según las variables que se han analizado (Cadena-Iñiguez et al., 2018). Dicho de otra forma, las funciones de los sitios intervenidos con MIAF se potencian y diversifican.

Sin embargo, la investigación relacionada con la evaluación de la multifuncionalidad generalmente se enfoca a una sola variable o en múltiples variables, pero que representan un solo tipo de beneficios (Meyer et al., 2017; van Vooren et al., 2018). Estas acotaciones reflejan la complejidad del análisis de la multifuncionalidad que refieren los investigadores que han abordado el tema (Mastrangelo et al., 2014; Stürck & Verburg, 2017). A esto se suma la necesidad que se ha reportado sobre especificar las funciones y por qué utilizarlas en las evaluaciones realizadas (Garland et al., 2021).

Una opción para dar respuesta a problemas con numerosos factores a considerar como ocurren en el sistema MIAF es el análisis de decisión multicriterio; un conjunto de métodos apreciados por su capacidad para integrar múltiples

dimensiones, proporcionar un enfoque holístico a los procesos de toma de decisiones en contextos complejos, en esa medida representan una opción para la evaluación de la multifuncionalidad de sistemas agroforestales (Alinezhad & Khalili, 2019; Ishizaka & Nemery, 2013; Rodríguez Sousa et al., 2020).

1.3. Objetivos

General

Generar una propuesta metodológica para la evaluación de la multifuncionalidad de sistemas Milpa Intercalada con Árboles Frutales basada en métodos de análisis multicriterio que incluya la opinión de especialistas en temas sociales y ambientales, para realizar la valoración integral del sistema de interés.

Objetivos específicos

- Analizar el concepto de multifuncionalidad, metodologías e indicadores que han determinado la evaluación de la multifuncionalidad, mediante la revisión de literatura, para la selección de los indicadores apropiados según los intereses del estudio, con la participación de especialistas en temas sociales y ambientales.
- Generar una metodología para la evaluación de la multifuncionalidad de sistemas Milpa Intercalada con Árboles Frutales, basada en métodos de análisis multicriterio, que incluya la opinión de especialistas en temas sociales y ambientales, para una valoración integral del sistema.
- Aplicar la metodología propuesta utilizando datos empíricos, la experiencia de productores e información de acceso libre sobre el contexto social y ambiental de sistemas Milpa Intercalada con Árboles Frutales, para el análisis del funcionamiento de la propuesta metodológica.

1.4. Hipótesis

Los métodos de análisis multicriterio permiten integrar diversas dimensiones sociales y ambientales mediante el uso de indicadores, lo que los hace

adecuados para evaluar la multifuncionalidad del sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales.

1.5. Literatura citada

- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J. I., Livera-Muñoz, M., & Mendoza-Castillo, M. C. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513–531.
- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM) (Vol. 277). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H. del C., & González-Cifuentes, J. H. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351–1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Camas Gómez, R., Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Livera Muñoz, M., González Estrada, A., Villar Sánchez, B., López Martínez, J., Espinoza Paz, N., & Cadena Iñiguez, P. (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(2), 231–243.
- Garland, G., Banerjee, S., Edlinger, A., Miranda Oliveira, E., Herzog, C., Wittwer, R., Philippot, L., Maestre, F. T., & Heijden, M. G. A. (2021). A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review. *Journal of Ecology*, 109(2), 600–613. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13511>
- Hernández-Escobar, M. R., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., & Camas-Gómez, R. (2024). Maíz y frijol en MIAF con diferentes labranzas y arreglos topológicos. *Terra Latinoamericana*, 42, Article e1388, 1–6. <https://doi.org/10.28940/terra>
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). Multi-criteria decision analysis (First). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118644898>
- Liberati, M. R., Sowa, S. P., May, C. A., & Doran, P. J. (2020). Making measures count: Structured indicator selection to improve program success. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, Article 100077. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2020.100077>
- López Gaytán, J., Jiménez Sánchez, L., León Merino, A., Figueroa Rodríguez, Ó. L., Morales Guerra, M., & González Romero, V. (2008). Escuelas de campo, para capacitación y divulgación con tecnologías sustentables en comunidades indígenas. *Agricultura Técnica en México*, 34(1), 33–42. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v34n1/v34n1a4.pdf>
- Mastrangelo, M. E., Weyland, F., Villarino, S. H., Barral, M. P., Nahuelhual, L., & Laterra, P. (2014). Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29, 345–358. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9959-9>

- Meyer, S. T., Ptacnik, R., Hillebrand, H., Bessler, H., Buchmann, N., Ebeling, A., Eisenhauer, N., Engels, C., Fischer, M., Halle, S., Klein, A.-M., Oelmann, Y., Roscher, C., Rottstock, T., Scherber, C., Scheu, S., Schmid, B., Schulze, E.-D., Temperton, V. M., Tschardtke, T., Voigt, W., Weigelt, A., Wilcke, W. & Weisser, W. W. (2017). Biodiversity–multifunctionality relationships depend on identity and number of measured functions. *Nature Ecology & Evolution*, 2(1), 44–49. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0391-4>
- Montenero, K., Kelble, C., & Broughton, K. (2021). A quantitative and qualitative decision-making process for selecting indicators to track ecosystem condition. *Marine Policy*, 129, Article 104489. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2021.104489>
- Moreno-Calles, A. I., Casas, A., Rivero-Romero, A. D., Romero-Bautista, Y. A., Rangel-Landa, S., Fisher-Ortíz, R. A., Alvarado-Ramos, F., Vallejo-Ramos, M., & Santos-Fita, D. (2016). Ethnoagroforestry: Integration of biocultural diversity for food sovereignty in Mexico. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s13002-016-0127-6>
- Muñoz-Ruiz, E., Santiago-Mejía, H., Ronquillo-Cedillo, I., Albino-Garduño, R., Cortés-Flores, J. I., & Grossman, J. (2024). Vegetative growth of peach trees [*Prunus persica* (L.) Batsch] associated with native squash (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo* L.) and bayocote (*Phaseolus coccineus* L.) in Milpa Intercropped with Fruit Trees system (MIAF) systems. *Agrociencia*, 58(5), 543-556. <https://doi.org/10.47163/agrociencia>
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2021). An introduction to agroforestry. In P. K. R. Nair, B. M. Kumar, & V. D. Nair (Eds.), *Ecosystem services of agroforestry* (pp. 477-486). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0_3
- Ordoñez-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. *Revista Campo-Territorio*, 17(48), 109–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.14393/RCT174867657>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024). Versión resumida de El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2024. Transformación de los sistemas agroalimentarios orientada hacia el valor. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd2616es>
- Ortiz-Jiménez, B., Vásquez-Ortiz, F., & Ramírez-Cuevas, C. (2023). Aprendizaje, capital social y redes sociales, en productores de la Mixteca Alta de Oaxaca. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20(1), 25–40.
- Pillado Albarrán, K. V., Albino Garduño, R., Santiago Mejía, H., & Pedraza Mandujano, J. (2023). Capital social y acción colectiva para consolidar el MIAF mazahua. *Revista de Estudios Regionales Nueva Época*, 1(2), 26–45. <https://doi.org/10.59307/terne1.229>
- Rodríguez Sousa, A. A., Parra-lópez, C., Sayadi-Gmada, S., Barandica, J. M., & Rescia, A. J. (2020). A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using

- the analytic hierarchy process. *Ecological Economics*, 173, Article 106658. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106658>
- Romero-Figueiras, T., Andrés-Meza, P., Murguía-González, J., Espinosa-Calderón, A., Maldonado-Saavedra, O., & Leyva-Ovalle, O. R. (2024). The role of microbial fertilizers in diversified cropping systems. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), Article e4007. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4007>
- Stürck, J., & Verburg, P. H. (2017). Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. *Landscape Ecology*, 32, 481–500. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0459-6>
- Torres Zambrano, J. P., Cortés Flores, J. I., Turrent Fernández, A., Volke Haller, V. H., Ortiz Solorio, C. A., & Jiménez López, A. (2021). Caracterización físico-química y clasificación del suelo de ladera manejado bajo el sistema milpa intercalada con árboles frutales. *Teknos Revista Científica*, 21(2), 35–45. <https://doi.org/10.25044/25392190.1031>
- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., Hernández Romero, E., Camas Gómez, R., Torres Zambrano, J. P., & Zambada Martínez, 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.
- Tzuk, O., Uecker, H., & Meron, E. (2020). The role of spatial self-organization in the design of agroforestry systems. *PLoS ONE*, 15(7), Article e0236325. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236325>
- Van Vooren, L., Reubens, B., Ampoorter, E., Broekx, S., Pardon, P., Van Waes, C., & Verheyen, K. (2018). Monitoring the impact of hedgerows and grass strips on the performance of multiple ecosystem service indicators. *Environmental Management*, 62(2), 241–259. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1043-4>

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Este apartado se desagregó en tres sub capítulos. El primero para describir los orígenes del sistema MIAF y dar un contexto a grandes rasgos de los avances en su investigación. Enseguida una explicación general de los conceptos centrales que se abordarán en el presente trabajo y finalmente una aproximación sobre la evaluación de la multifuncionalidad.

2.1. Marco contextual

El desarrollo de la tecnología agroforestal MIAF, es producto de la investigación aplicada colaborativa entre el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas por más de 30 años (Turrent Fernández et al., 2017). Según, Cortés y Turrent (2012, como se citó en Turrent Fernández, 2017) uno de los precursores de esta tecnología es el modelo de intensificación de la milpa histórica desarrollado por productores tradicionales en municipios del estado de Puebla. Otro es la implementación de la tecnología de terraza de muro vivo para laderas de acuerdo con Turrent et al. (1995, como se citó en Turrent Fernández, 2017).

A través de tiempo el sistema MIAF ha evolucionado, inicialmente con mayor intervención de investigadores de las instituciones antes mencionadas, hasta la actualidad con trabajos de tesis (Arriaga Vázquez, 2019; Marcos Rivera, 2023; Ordóñez Ovalle, 2021; Torres Zambrano, 2016), artículos científicos en tópicos variados (Capetillo Burela et al., 2024; Martín-Canché et al., 2025; Montes-Ramírez & Sánchez-Juárez, 2024), proyectos diversos sobre esta tecnología por parte de otras instancias, incluyendo al gobierno que la impulsa a través del Programa Sembrando Vida.

Las investigaciones realizadas sobre la tecnología MIAF incluyen análisis de los rendimientos (Cadena-Iñiguez et al., 2018; Turrent Fernández et al., 2017), las podas de los frutales (Torres Zambrano et al., 2008), fertilización (Santiago-Mejía et al., 2021), captura de carbono, análisis financiero, perspectivas de los productores y algunos avances sobre el estudio de la sostenibilidad. Este último

analiza el sistema de producción desde diferentes dimensiones, abordando aspectos económicos, sociales y ambientales. Una serie de elementos que son reflejo de los múltiples fenómenos que ocurren tanto al interior como con el entorno de este sistema.

Durante muchos años, típicamente los sistemas MIAF, se conformaban de árboles frutales de manzano (*Malus domestica*), durazno (*Prunus persica*), aguacate (*Persea americana*), chicozapote (*Manilkara zapota*) o limón persa (*Citrus latifolia*), entre los reportados con más frecuencia, según el tipo de clima (Fonteyne et al., 2022; Turrent Fernández et al., 2017). En los últimos años se han incorporado mayor diversidad de especies frutales como el mango (*Mangifera indica*), plátano (*Musa spp.*), papaya (*Carica papaya*), piña (*Ananas comosus*), pitahaya (*Hylocereus undatus*), cacao (*Theobroma cacao*), entre otros frutales o maderables y especies de usos múltiples (Cruz González, 2024; Montes-Ramírez & Sánchez-Juárez, 2024; Tapia-Hernández et al., 2024).

Los avances en la investigación sobre la tecnología MIAF, documentados en artículos científicos, se describen de manera más amplia en el capítulo 5 de este documento.

2.2. Marco conceptual

De acuerdo con Nair et al. (2021), la agroforestería es un sistema de uso de la tierra que implica la mezcla o retención deliberada de árboles con cultivos y/o animales en combinaciones interactivas para múltiples beneficios. El papel de los SAF en la continuidad de los rendimientos de los cultivos, la diversificación de la producción agrícola, la procuración de los servicios ecosistémicos, entre otras contribuciones a la sociedad, ha recibido cada vez más atención en los programas y paradigmas de desarrollo en todo el mundo (Bado et al., 2021; Bettles et al., 2021; Lalani et al., 2021). Actualmente, los SAF destacan como un enfoque para aprovechar los atributos de sostenibilidad y los múltiples beneficios que ofrecen (Tzuk et al., 2020).

Los SAF se encuentran relacionados de manera estrecha con el término de multifuncionalidad. Este concepto y sus derivados aún se consideran poco claros (Song et al., 2020), complejos, con diversas definiciones e interpretaciones. Sin embargo, existe un consenso general sobre las múltiples funciones involucradas en multifuncionalidad, que van desde la producción de alimentos y fibras hasta la generación de múltiples bienes y servicios ambientales y sociales. Una explicación más amplia del concepto de multifuncionalidad se presenta en el capítulo 4.

2.3. Marco metodológico

Las mediciones de campo que evalúan múltiples servicios en el mismo sitio son escasas (Li et al., 2021; Manning et al., 2018). La mayoría de los trabajos de monitoreo publicados se centran en una sola variable o en múltiples variables que representan un servicio ecosistémico (por ejemplo, concentraciones de N y P como indicadores de la calidad química del agua). En términos generales, los estudios relacionados con la evaluación de la multifuncionalidad, ventajas y desventajas se centran en servicios ecosistémicos individuales o en aspectos específicos.

Algunos autores afirman que los sitios de evaluación o monitoreo de la multifuncionalidad a menudo se seleccionan para demostrar la prestación máxima de un servicio específico (Meyer et al., 2017; Van Vooren et al., 2018). En este mismo sentido, Manning et al. (2018) sugirieron que la medida de multifuncionalidad siempre comprenderá un subconjunto de las funciones o servicios posibles y, por lo tanto, captará solo una fracción de la multifuncionalidad "verdadera". Otros autores añaden que el valor y la solidez de las evaluaciones de la multifuncionalidad dependen principalmente de las funciones utilizadas para calcularla. De ahí la importancia de reflexionar sobre las variables y su asociación con las funciones que serán objeto de estudio (Garland et al., 2021).

Desde el punto de vista de Garland et al. (2021), las investigaciones realizadas sobre multifuncionalidad no esclarecen la amplia gama de funciones potenciales estudiadas. Por tanto, resalta la necesidad de que en lo subsecuente se especifique cuáles se incluyen en los análisis y porqué. Así los lectores puedan interpretar de manera adecuada la evaluación de multifuncionalidad del sistema general, dentro del contexto de cada función específica estudiada (Veldkamp et al., 2023; Zhang et al., 2023).

En algunos casos, la formación profesional o actividad que se desempeña agrega otra perspectiva. Por ejemplo, la visión de los agrónomos sobre los sistemas agrícolas se orienta a la productividad, mientras que los ecologistas y los investigadores ambientales se enfocan en el impacto ambiental de la agricultura. Sin embargo, en una situación ideal, los sistemas de producción agrícola deberían proporcionar el equilibrio deseado de servicios de aprovisionamiento (p. ej., producción de fibras), servicios de regulación (p. ej., suelo y agua) y servicios de apoyo (p. ej., biodiversidad) dentro de límites socioeconómicos viables (p. ej., ingresos garantizados y condiciones de trabajo adecuadas) (Wittwer et al., 2021).

En general, los investigadores en el tema afirman que los métodos y herramientas para evaluar, diseñar y dar seguimiento a la multifuncionalidad son limitados (Garland et al., 2021). La evaluación de multifuncionalidad plantea problemas de alta complejidad para considerar todos o la mayoría de los factores que intervienen (Tzuk et al., 2020). Además, la identificación e integración de variables o indicadores también es un desafío importante, de manera que se necesitan procesos transparentes y sistemáticos de selección de indicadores que consideren la relevancia de estos para las partes interesadas (Liberati et al., 2020; Montenero et al., 2021).

El análisis de la multifuncionalidad de los sistemas se ha realizado a escala de paisaje, a nivel de finca, incluso hay estudios que abordan la multifuncionalidad del suelo con muestras en laboratorio. Algunas de estas investigaciones se han guiado de lo establecido en la evaluación de los ecosistemas del milenio o de los

servicios ecosistémicos determinados por la FAO en colaboración con sus asociados.

Un ejemplo de lo antes descrito es el trabajo de Ostandie et al. (2022), quienes se basaron en 14 variables relacionadas con cinco bienes correspondientes a los servicios ecosistémicos de regulación, apoyo y aprovisionamiento; además consideraron el desempeño económico. La evaluación consistió en calcular dos índices de multifuncionalidad, uno basado en bienes agroecosistémicos y el otro en servicios ecosistémicos y desempeño económico. Para ello promediaron los valores individuales, después los estandarizaron en cada categoría de bien. Luego estandarizaron cada bien y evaluaron los índices de multifuncionalidad promediando los cinco bienes del agroecosistema. A nivel de servicio utilizaron el mismo enfoque, pero los servicios ecosistémicos se ponderaron por el número de bienes agroecosistémicos considerados. Para las variables donde los valores nulos o más bajos indicaban niveles más altos de bienes agroecosistémicos los valores se invirtieron.

Entre los esfuerzos para efectuar análisis más integrales, se encuentra el realizado por Rodríguez-Sousa et al. (2020), quienes utilizaron 10 indicadores en la dimensión ambiental (muestreo de campo e información cartográfica), tres indicadores de tipo social (encuestas) y un indicador económico (encuestas). El método aplicado para evaluar la multifuncionalidad fue el Proceso Jerárquico Analítico. Este ejemplo de evaluación forma parte de la revisión que se presenta en los siguientes dos capítulos.

2.4. Contenido temático

Los siguientes cuatro capítulos documentan el trabajo de investigación para desarrollar la propuesta metodológica de evaluación de la multifuncionalidad del MIAF basada en métodos de análisis multicriterio. A continuación, se presenta una descripción sintetizada del contenido de tales capítulos.

Capítulo 3. Es un análisis bibliométrico para identificar las publicaciones científicas, su procedencia, frecuencia de citación y términos recurrentes en la

evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas, mediante la revisión de los artículos registrados en las bases de datos Scopus y Web of Science. Asimismo, se analizaron las principales áreas temáticas en la evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas a través de la elaboración de mapas bibliométricos con el software VOSviewer.

Capítulo 4. Contiene el análisis de la interpretación de multifuncionalidad en investigaciones que realizaron la evaluación de agroecosistemas y se describen las evaluaciones a través de la identificación de los tipos de metodologías e indicadores utilizados.

Capítulo 5. Comprende un análisis de la investigación realizada sobre el sistema MIAF mediante la revisión de las temáticas abordadas en publicaciones científicas con el fin de comprender su desempeño como tecnología agroforestal en función de sus propósitos de diseño.

Capítulo 6. En este apartado se propone la metodología de evaluación de la multifuncionalidad del sistema MIAF basada en Métodos de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones, mediante un marco que vincula los objetivos del sistema de interés con indicadores y variables cuantitativas y cualitativas que cubren aspectos sociales y ambientales. Asimismo, se analiza la aplicación de la metodología generada utilizando información obtenida sobre sistemas MIAF y otros sistemas agroforestales circundantes, en diferentes escenarios de importancia de indicadores y variables.

2.5. Literatura citada

- Bado, B. V., Whitbread, A., & Sanoussi Manzo, M. L. (2021). Improving agricultural productivity using agroforestry systems: Performance of millet, cowpea, and ziziphus-based cropping systems in West Africa Sahel. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 305, Article 107175. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.107175>
- Bettles, J., Battisti, D. S., Cook-Patton, S. C., Kroeger, T., Spector, J. T., Wolff, N. H., & Masuda, Y. J. (2021). Agroforestry and non-state actors: A review. *Forest Policy and Economics*, 130, Article 102538. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2021.102538>

- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H. del C., & González-Cifuentes, J. H. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351–1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Capetillo Burela, Á., Zetina Lezama, R., Reynolds Chávez, M. A., Morales Guerra, M., Matilde Hernández, C., Camporredondo Mora, R., Peralta Antonio, N., & Nataren Velázquez, J. (2024). Situación actual de las pequeñas unidades de producción familiar en el estado de Hidalgo, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), Article e71031. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-120>
- Cruz González, L. D. (2024). Sembrando Vida en San Luis Potosí. Organización y resultados en materia ambiental, social y economía local. *Revista Políticas Públicas*, 17(1), 3–28.
- Fonteyne, S., Silva Avendaño, C., Ramos Sanchez, A., Torres Zambrano, J. P., García Dávila, F., Pérez Martínez, Z., García Dávila, A., Castillo Villaseñor, L., & Verhulst, N. (2022). Innovating traditional production systems through on-farm conservation agriculture and agroforestry research. *Frontiers in Agronomy*, 3, Article 787507. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.787507>
- Garland, G., Banerjee, S., Edlinger, A., Miranda Oliveira, E., Herzog, C., Wittwer, R., Philippot, L., Maestre, F. T., & Heijden, M. G. A. (2021). A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review. *Journal of Ecology*, 109(2), 600–613. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13511>
- Lalani, B., Aminpour, P., Gray, S., Williams, M., Büchi, L., Haggard, J., Grabowski, P., & Damiro, J. (2021). Mapping farmer perceptions, conservation agriculture practices and on-farm measurements: The role of systems thinking in the process of adoption. *Agricultural Systems*, 191, Article 103171. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2021.103171>
- Li, K., Zhang, H., Li, X., Wang, C., Zhang, J., Jiang, R., Feng, G., Liu, X., Zuo, Y., Yuan, H., Zhang, C., Gai, J., & Tian, J. (2021). Field management practices drive ecosystem multifunctionality in a smallholder-dominated agricultural system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, Article 107389. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2021.107389>
- Liberati, M. R., Sowa, S. P., May, C. A., & Doran, P. J. (2020). Making measures count: Structured indicator selection to improve program success. *Environmental and Sustainability Indicators*, 8, Article 100077. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2020.100077>
- Manning, P., van der Plas, F., Soliveres, S., Allan, E., Maestre, F. T., Mace, G., Whittingham, M. J., & Fischer, M. (2018). Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2(3), 427–436. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0461-7>
- Martín-Canché, B. del R., Rodríguez-Ávila, N. L., Verdel-Aranda, K., Vanoye-Eligio, M., Cetzal-Ix, W., Casado-Ramírez, E. del J., & Guillen-Taje, J. L. (2025). Riqueza de hongos micorrícicos arbusculares asociadas a especies forestales en el sureste del estado de Campeche, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1–11. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2031>

- Meyer, S. T., Ptacnik, R., Hillebrand, H., Bessler, H., Buchmann, N., Ebeling, A., Eisenhauer, N., Engels, C., Fischer, M., Halle, S., Klein, A.-M., Oelmann, Y., Roscher, C., Rottstock, T., Scherber, C., Scheu, S., Schmid, B., Schulze, E.-D., Temperton, V. M., Tschardtke, T., Voigt, W., Weigelt, A., Wilcke, W. & Weisser, W. W. (2017). Biodiversity–multifunctionality relationships depend on identity and number of measured functions. *Nature Ecology & Evolution*, 2(1), 44–49. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0391-4>
- Montenero, K., Kelble, C., & Broughton, K. (2021). A quantitative and qualitative decision-making process for selecting indicators to track ecosystem condition. *Marine Policy*, 129, Article 104489. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2021.104489>
- Montes-Ramírez, K. A., & Sánchez-Juárez, G. K. (2024). Programa Sembrando Vida en el municipio San Miguel Talea de Castro, Oaxaca, México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(63), 1-26. <https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1420>
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2021). An introduction to agroforestry. In P. K. R. Nair, B. M. Kumar, & V. D. Nair (Eds.), *Definition and concepts of agroforestry* (pp. 21-28). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75358-0_3
- Ostandie, N., Giffard, B., Tolle, P., Ugaglia, A. A., Thiéry, D., & Rusch, A. (2022). Organic viticulture leads to lower trade-offs between agroecosystem goods but does not improve overall multifunctionality. *Agricultural Systems*, 203, Article 103489. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103489>
- Rodríguez Sousa, A. A., Parra-López, C., Sayadi-Gmada, S., Barandica, J. M., & Rescia, A. J. (2020). A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using the analytic hierarchy process. *Ecological Economics*, 173, Article 106658. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106658>
- Santiago-Mejía, H., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., Albino-Garduño, R., Volke-Haller, V. H., & Zavaleta-Mancera, H. A. (2021). Yield and fruit quality of bi-varietal peach trees in a MIAF system exposed to frosts. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 107–114.
- Song, B., Robinson, G. M., & Bardsley, D. K. (2020). Measuring multifunctional agricultural landscapes. *Land*, 9(8), Article 260. <https://doi.org/10.3390/land9080260>
- Tapia-Hernández, A., Aldasoro-Maya, M. E., Rodríguez-Robles, U., Martínez-Zurimendi, P., & Rosset, P. (2024). Milpa intercalada con árboles frutales: revisión y estudio de caso en el Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(2), 168–185. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1580>
- Torres Zambrano, J. P., Cortés Flores, J. I., Turrent Fernández, A., Hernández Romero, E., & Muratalla Lúa, A. (2008). Fruit yield and number of scaffold branches in peach trees intercropped with milpa. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 265–273. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., Hernández Romero, E., Camas Gómez, R., Torres Zambrano, J. P., & Zambada Martínez, 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.
- Tzuk, O., Uecker, H., & Meron, E. (2020). The role of spatial self-organization in the design of agroforestry systems. *PLoS ONE*, 15(7), Article e0236325. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236325>
- Van Vooren, L., Reubens, B., Ampoorter, E., Broekx, S., Pardon, P., Van Waes, C., & Verheyen, K. (2018). Monitoring the impact of hedgerows and grass strips on the performance of multiple ecosystem service indicators. *Environmental Management*, 62(2), 241–259. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1043-4>
- Veldkamp, E., Schmidt, M., Markwitz, C., Beule, L., Beuschel, R., Biertümpfel, A., Bischel, X., Duan, X., Gerjets, R., Göbel, L., Graß, R., Guerra, V., Heinlein, F., Komainda, M., Langhof, M., Luo, J., Potthoff, M., van Ramshorst, J. G. V., Rudolf, C., Seserman, D. M., Shao, G., Siebicke, L., Svoboda, N., Swieter, A., Carminati, A., Freese, D., Graf, T., Greef, J. M., Isselstein, J., Jansen, M., Karlovsky, P., Knohl, A., Lamersdorf, N., Priesack, E., Wachendorf, C., Wachendorf, M. & Corre, M. D. (2023). Multifunctionality of temperate alley-cropping agroforestry outperforms open cropland and grassland. *Communications Earth & Environment*, 4, Article 20. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>
- Wittwer, R. A., Bender, F. S., Hartman, K., Hydbom, S., Lima, R. A. A., Loaiza, V., Nemecek, T., Oehl, F., Olsson, P. A., Petchey, O., Prechsl, U. E., Schlaeppli, K., Scholten, T., Seitz, S., Six, J., & A van der Heijden, M. G. (2021). Organic and conservation agriculture promote ecosystem multifunctionality. *Science Advances*, 7, Article eabg6995. <https://www.science.org>
- Zhang, Y., Long, H., Chen, S., Ma, L., & Gan, M. (2023). The development of multifunctional agriculture in farming regions of China: Convergence or divergence? *Land Use Policy*, 127, Article 106576. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2023.106576>

CAPÍTULO 3. TENDENCIAS Y TEMÁTICAS EN LA EVALUACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD DE AGROECOSISTEMAS: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO³

3.1. Summary

Background: Agroecosystems provide a wide range of goods and services to society, whose complexity varies depending on the context in which they develop. These characteristics represent a challenge in their evaluation; however, understanding their functioning and identifying areas for improvement is crucial. In this regard, it is essential to consider advances in scientific research on the evaluation of these systems to properly guide future work in this field. **Objectives:** To identify scientific publications, their origins, citation frequency, and recurrent terms in the evaluation of agroecosystem multifunctionality through a review of articles registered in the Scopus and Web of Science databases, and to analyze the main thematic areas by creating bibliometric maps with the VOSviewer software. **Methodology:** A review of scientific articles addressing the evaluation of agroecosystem multifunctionality was performed. The initial search resulted in 302 manuscripts, which were reduced to 65 articles in English and one in Spanish after a screening process. This set of publications was systematized and analyzed using Excel and the Bibliometrix application to address the first objective. Additionally, the bibliometric technique of term co-occurrence was applied using VOSviewer to delineate thematic groups, whose characteristics were reviewed using Excel. **Main Findings:** The results reveal a significant increase in the publication of articles related to the topic of interest in the past seven years, with 73% of the articles published during this period. At the country level, China, Spain, France, the Netherlands, Germany, Belgium, India, and Portugal account for 64% of the study sites, with a clear predominance of work in China. The three main thematic groups in the research are: 1) Multidimensional evaluation of agroecosystems; 2) Evaluation of agroecosystems multifunctionality based on

³ Sometido: Tropical and Subtropical Agroecosystems.
Estatus: publicado.

their biodiversity; 3) Evaluation of soil multifunctionality in agroecosystems. **Implications:** The accumulated experiences in this field offer diverse perspectives that should be considered when applying any methodology. A trend observed is the increasingly comprehensive nature of studies, which incorporate indicators from various dimensions and emphasize the importance of addressing agroecosystem multifunctionality holistically. **Conclusion:** The number of studies on this topic is increasing, with different approaches and multidisciplinary work, recognizing the complexity and importance of agroecosystems in the global sustainability agenda.

Key words: multifunctional agriculture; ecosystem services; evaluation methodologies; literature review.

3.2. Resumen

Antecedentes. Los agroecosistemas ofrecen una amplia gama de bienes y servicios a la sociedad, cuya complejidad varía según el contexto en el que se desarrollen. Tales características representan un desafío en su evaluación; sin embargo, comprender su funcionamiento y detectar áreas de mejora es fundamental. En este sentido, es de suma importancia considerar los avances en la investigación científica sobre la evaluación de estos sistemas para orientar adecuadamente los trabajos futuros en este campo. **Objetivos.** Identificar las publicaciones científicas, su procedencia, frecuencia de citación y términos recurrentes en la evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas, mediante la revisión de los artículos registrados en las bases de datos Scopus y Web of Science, y analizar las principales áreas temáticas, a través de la elaboración de mapas bibliométricos con el software VOSviewer. **Metodología.** Se realizó una revisión de los artículos científicos que abordan la evaluación de la multifuncionalidad de agroecosistemas. La búsqueda inicial dio como resultado 302 manuscritos que después de un proceso de depuración se redujeron a 65 artículos en inglés y uno en español. Este conjunto de publicaciones se sistematizó y analizó en Excel y la aplicación Bibliometrix, para responder al primer objetivo. Asimismo, se le aplicó la técnica bibliométrica de coocurrencia

de términos mediante VOSviewer para delimitar grupos temáticos, cuyas características fueron revisadas utilizando Excel. **Principales hallazgos.** Los resultados revelan un aumento significativo en la publicación de artículos relacionados en el tema de interés en los últimos siete años, con el 73% de los artículos en ese período. A nivel de países, China, España, Francia, Países Bajos, Alemania, Bélgica, India y Portugal concentran el 64% de los sitios de estudio, con una clara predominancia de trabajos en China. Los tres grupos temáticos principales en la investigación son: 1) Evaluación multidimensional de agroecosistemas; 2) Evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas según su biodiversidad; 3) Evaluación de la multifuncionalidad del suelo en agroecosistemas. **Implicaciones.** Las experiencias acumuladas en la temática ofrecen diversas perspectivas que deben ser consideradas al aplicar cualquier metodología en este campo. Una tendencia observada es la realización de estudios cada vez más integrales, que incorporan indicadores de diversas dimensiones, lo que subraya la importancia de abordar la multifuncionalidad de los agroecosistemas de manera holística. **Conclusión.** El número de investigaciones sobre el tema es creciente, con diferentes enfoques y son trabajos multidisciplinarios, en los que se reconoce la complejidad y la importancia de los agroecosistemas en la agenda global de sostenibilidad.

Palabras clave: agricultura multifuncional; servicios ecosistémicos; metodologías de evaluación; revisión de literatura.

3.3. Introducción

Los agroecosistemas son sistemas complejos que involucran una variedad de componentes bióticos y abióticos cuyo manejo influye en la producción de alimentos, la salud del medio ambiente y de la sociedad en general (Garland et al., 2021; Richter et al., 2021; Leroux et al., 2022). Las diversas funciones, servicios y beneficios que ofrecen contribuyen a la capacidad de las comunidades para resolver los desafíos ante crisis económicas, climáticas o de salud (Hodbod et al., 2016; Biswas et al., 2022). El conjunto de propiedades que poseen resalta su multifuncionalidad (MF), misma que puede cambiar a través del tiempo y

según el contexto en el que se encuentre (Torralba et al., 2018; Lin and Yun, 2023).

La MF en la agricultura y gestión de la tierra es un enfoque integral que reconoce la contribución de los sistemas agrícolas a diversos objetivos como la prosperidad económica, el bienestar social y la salud de los ecosistemas (Fagioli et al., 2017; Zinchuk et al., 2021; Rac, Erjavec and Erjavec, 2023). Esta perspectiva es esencial para enfrentar los desafíos globales presentes y futuros relacionados con la agricultura y la alimentación (Valujeva et al., 2016; Tran et al., 2022; Tanács et al., 2023). En ese sentido, organismos internacionales destacan la necesidad de procurar sistemas agroalimentarios resilientes, inclusivos y sostenibles, enfocados en proveer alimentos suficientes, seguros y nutritivos de manera accesible para todos (FAO, 2022).

Una forma de comprender el funcionamiento y localizar áreas de mejora en los agroecosistemas es mediante su evaluación. Esta tarea consiste en analizar y valorar una variedad de aspectos del sistema, así como sus repercusiones sociales, económicas y ambientales, desde la perspectiva de la MF. Por lo tanto, evaluar la MF es crucial para promover una gestión agrícola informada y sostenible que puede permitir identificar y apreciar todas las funciones que los agroecosistemas brindan a la sociedad, el medio ambiente y la economía, facilitando así la adopción de decisiones equilibradas y sostenibles en el sector agrícola.

La complejidad de la evaluación de la MF de los agroecosistemas también es evidente en los diferentes enfoques, escalas de valoración, profundidad en el análisis, metodologías e indicadores utilizados (Lovell et al., 2010; Mastrangelo et al., 2014; van der Plas et al., 2019; Vazquez et al., 2021). Esta diversidad debe tenerse en cuenta para centrar los futuros esfuerzos de investigación en áreas que maximicen los recursos disponibles y mejoren el flujo de resultados en torno al tema.

En este contexto, la revisión bibliométrica es una herramienta esencial para valorar, medir y apoyar en la comprensión de la investigación científica en el tema de interés. Esta metodología es reconocida por su capacidad para asistir a la comunidad científica en la toma de decisiones informadas, identificar tendencias y colaboraciones, además de medir el impacto y la visibilidad de los estudios realizados. Por lo tanto, se convierte en un recurso indispensable para guiar y enriquecer la investigación en el campo científico (Peralta González, Frías Guzmán and Gregorio Chaviano, 2015).

Los argumentos antes mencionados dieron origen a esta revisión bibliométrica bajo el planteamiento de los siguientes objetivos: 1) Identificar las publicaciones científicas, su procedencia, frecuencia de citación y términos recurrentes en la evaluación de la MF de los agroecosistemas, mediante la revisión de los artículos registrados en las bases de datos Scopus y Web of Science, y 2) Analizar las principales áreas temáticas en la evaluación de la MF de los agroecosistemas a través de la elaboración de mapas bibliométricos con el software VOSviewer, según los registros de las bases de datos Scopus y Web of Science.

3.4. Materiales y métodos

Este estudio es un análisis bibliométrico que utilizó las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS), consideradas como las más extensas por la cobertura que ofrecen (Pranckutė, 2021). La búsqueda inicial incluyó todos los años de publicaciones sobre el tema de interés. A partir de los filtros que permiten aplicar ambas plataformas se acotó a investigaciones de las áreas de agronomía y ciencias ambientales. Las palabras clave de búsqueda que ofrecieron la mayor cantidad de artículos sobre el tema fueron: “multifunctionality”, “agriculture”, “ecosystem services”, “evaluation”, “assessment”, “analysis”, “measurement”, “indice”, “variable”, “indicator” y “criteria”. Los resultados de la búsqueda en ambos repositorios reunieron 302 artículos en total. Estos fueron publicados desde 1999 hasta 2003, en alguno de los idiomas siguientes: inglés, chino mandarín, alemán, español o italiano. Estos manuscritos pasaron por una serie de depuraciones que se explican con mayor detalle en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Proceso depuración en la búsqueda de artículos sobre el tema de investigación.

Paso	Descripción	No. Artículos
1	Artículos encontrados en las bases de datos utilizando las palabras de búsqueda (201 en Scopus y 101 en WoS).	302
2	Eliminar los registros duplicados después de unir ambas bases de datos.	255
3	Selección de los artículos estrechamente relacionados con el tema de investigación, mediante la lectura de los resúmenes.	119
4	Selección de los artículos estrechamente vinculados al tema de la evaluación de la multifuncionalidad a partir de la lectura de cada artículo en sus diferentes apartados.	66

Nota: el periodo de publicación de los 66 manuscritos seleccionados es de 2008 al 2023; son 65 artículos en inglés y uno en español.

La base de datos resultante, que contenía 66 artículos seleccionados tras el proceso de depuración, se complementó con información adicional sobre el origen de las evaluaciones de MF reportadas en cada manuscrito. Esta base de datos final fue analizada utilizando Excel y el paquete Bibliometrix para abordar el primer objetivo de este estudio.

El segundo objetivo se trató en dos etapas. En la primera etapa, se empleó el software VOSviewer, especializado en la representación gráfica de mapas bibliométricos y conocido por su enfoque en la visualización (van Eck and Waltman, 2010), para analizar los resúmenes de la base de datos depurada. La técnica aplicada fue la biometría de coocurrencia para analizar la coincidencia y la fuerza de asociación entre términos, facilitando así la construcción de grupos temáticos. El umbral mínimo aplicado fue de 10 coocurrencias, lo que permitió identificar inicialmente 44 términos relevantes. Para asegurar la calidad y pertinencia del análisis, se realizó una selección adicional de términos basada en su frecuencia y relevancia en el contexto del estudio. De esta manera, se incluyeron solo aquellos términos que aparecieron de manera consistente y significativa en los artículos revisados. Este enfoque, similar al utilizado en

estudios previos (Boyack and Klavans, 2010; Waltman and van Eck, 2012; Perianes-Rodriguez, Waltman and van Eck, 2016), resultó en la inclusión del 60% de los términos más significativos, reduciendo la lista a 26 términos. El término "paper" fue eliminado por considerarse no esencial para definir las áreas temáticas, dejando 25 términos para el análisis en VOSviewer. Esta metodología permitió focalizar el análisis en los términos más representativos y evitar la inclusión de aquellos con menor impacto en la temática investigada, asegurando así la robustez y relevancia del análisis final.

En la segunda etapa para la atención del objetivo dos, se complementó la base de datos con información sobre las metodologías empleadas en las investigaciones revisadas. Posteriormente, las metodologías utilizadas se categorizaron en los tipos mencionados para cada grupo temático, en el apartado siguiente.

3.5. Resultados y discusión

Los resultados muestran aumento significativo en la publicación de artículos sobre el tema en los últimos siete años (Figura 1), periodo en el que se encontró 73% del total de publicaciones en este campo.

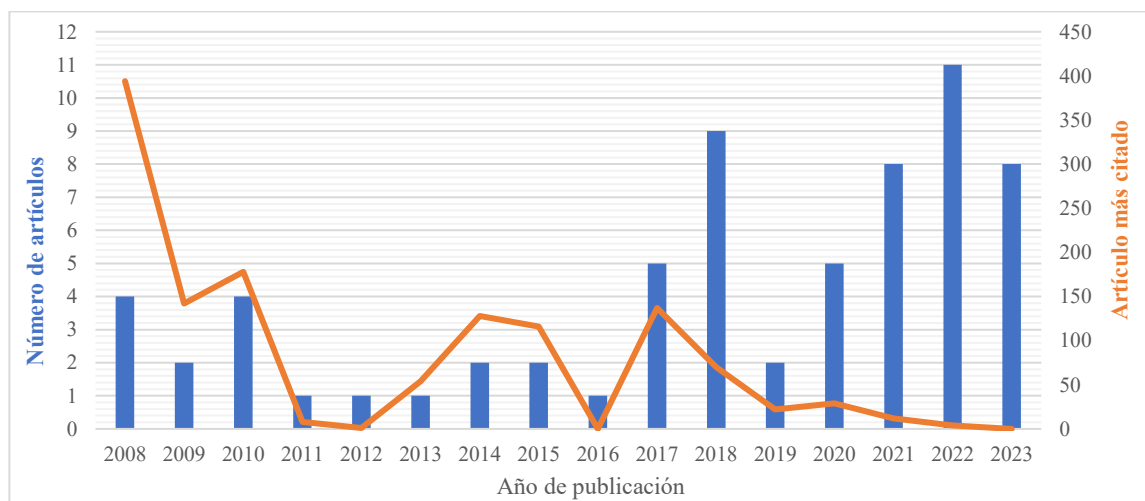


Figura 1. Evolución de las publicaciones y las citaciones en el periodo 2008-2023.

El artículo más citado corresponde al 2008 y sigue siendo el más referenciado hasta la fecha. En la Cuadro 2 destacan los 10 artículos más citados, que acumulan el 77% de las citas durante el periodo analizado. Estos trabajos se orientan principalmente en investigaciones multidimensionales. Otra característica de estos artículos es que fueron publicados en revistas enfocadas en ecología.

Cuadro 2. Las 10 publicaciones más citadas.

Citas	Referencia	Título del artículo	Revista
394	Gamfeldt, Hillebrand and Jonsson, 2008	Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning	Ecology
195	Willemen <i>et al.</i> , 2008	Spatial characterization of landscape functions	Landscape and Urban Planning
178	Willemen <i>et al.</i> , 2010	Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region	Ecological Indicators
142	Crossman and Bryan, 2009	Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality	Ecological Economics
137	Finney and Kaye, 2017	Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system	Journal of Applied Ecology
128	Mastrangelo <i>et al.</i> , 2014	Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services	Landscape Ecology
116	Rodríguez-Loinaz, Alday and Onaindia, 2015	Multiple ecosystem services landscape index: A tool for multifunctional landscapes conservation	Journal of Environmental Management
93	Stürck and Verburg, 2017	Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change	Landscape Ecology
86	Fleskens, Duarte and Eicher, 2009	A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves	Journal of Rural Studies

Citas	Referencia	Título del artículo	Revista
84	Parra-López, Calatrava-Requena and De-Haro-Giménez, 2008	A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework	Ecological Economics

El análisis sobre la procedencia geográfica mostró que Europa lidera como región pionera, aportando el 64% de las investigaciones. Este hallazgo respalda la tendencia identificada por Hölting et al. (2019) sobre el predominio europeo en esta área de estudio. También se destaca que Asia ocupa el segundo lugar con un 23%. En cuanto a la distribución por países, China, España, Francia, Países Bajos, Alemania, Bélgica, India y Portugal representan en conjunto el 64% de los lugares de estudio. China contribuye con el 21% de los estudios sobre la MF de agroecosistemas. Esta preminencia se ilustra en la Figura 2 y en el mapa bibliométrico (Figura 3), donde el término "China" figura entre los más destacados. Estas cifras implican que la mayoría de los países del mundo no presentan registro de algún estudio sobre el tema para esta revisión.

Moon (2015) sugiere que las diferencias en las contribuciones de investigación entre países pueden deberse al estado de desarrollo económico y la competitividad agrícola de cada nación, lo que influye en la demanda social de distintos aspectos de la agricultura multifuncional. También menciona que la mayoría de los debates académicos han estado enfocados en la agricultura europea, particularmente desde la Ley de Acuerdos de la Ronda de Uruguay, lo que limita la inclusión de perspectivas internacionales.

Con respecto al argumento de que la predominancia del inglés en los artículos indexados en las bases de datos utilizadas puede afectar la representatividad y diversidad de países con idiomas predominantes diferentes, como lo señala (Salatino, 2022), especialmente en la producción científica latinoamericana. Es relevante destacar que las publicaciones sobre el tema en español en estas

bases de datos son escasas, a pesar de que la búsqueda incluyó combinaciones de palabras clave en dicho idioma.

En cuanto a la tendencia de los términos utilizados, existe una notoria diversificación de palabras asociadas a la evaluación de la MF a partir de 2017. Términos como "servicio ecosistémico" y "biodiversidad" figuran entre los más empleados (Figura 2). Por ejemplo, autores como Vazquez et al. (2021) han analizado cómo la biodiversidad contribuye a aspectos como la provisión de hábitat, la productividad primaria y el ciclo de nutrientes.

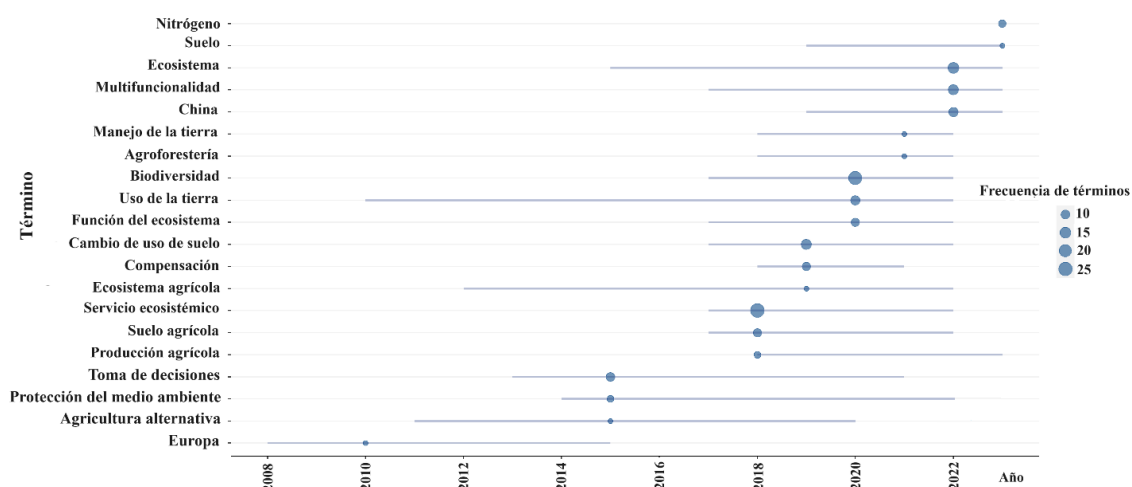


Figura 2. Tendencia de los términos utilizados en la evaluación de la MF de agroecosistemas.

3.5.1. Análisis para cada clúster

Mediante el programa VOSviewer se identificaron 25 términos y tres grupos temáticos con base en el resumen de los 66 artículos (Figura 3). El primer grupo, con un 38% de los términos, se denominó “Evaluación multidimensional de agroecosistemas”, que se refiere a las investigaciones realizadas en áreas geográficas espacialmente heterogéneas, caracterizadas por diversos tipos de vegetación o ecosistemas, múltiples unidades de producción, hasta estudios a nivel de país. El segundo grupo, con un porcentaje igual de términos, se nombró “Evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas según su biodiversidad”. El tercer grupo, que comprende el 19% de los términos se centró en la “Evaluación de la multifuncionalidad del suelo en agroecosistemas”. Un

término particularmente prominente fue "función de paisaje o función paisajística", que mostró conexiones con todos los grupos y sugiere la posibilidad de conformar un cuarto grupo para futuras investigaciones, según lo indican los resúmenes analizados.

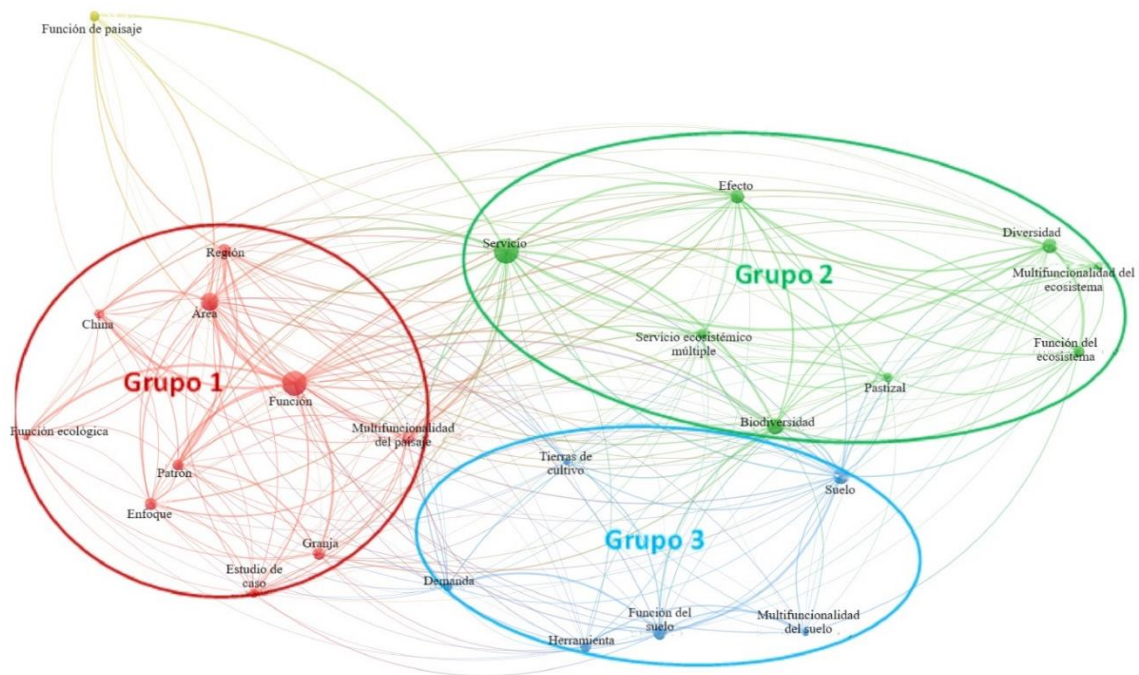


Figura 3. Mapa bibliométrico sobre evaluación de la MF de agroecosistemas.

Grupo 1. Evaluación multidimensional de agroecosistemas

Las investigaciones recientes que corresponden a esta clasificación destacan que los paisajes agrícolas ofrecen servicios esenciales más allá de su función productiva, incluyendo beneficios ecológicos, económicos, sociales y culturales (Balzan, Caruana and Zammit, 2018; Ren, 2021; Zinchuk et al., 2021). Para evaluar la MF de los agroecosistemas, se han utilizado diversas metodologías. Aproximadamente el 60% de los estudios emplean análisis espacial y modelado, mientras que alrededor del 30% se basan en la recolección de datos primarios a través de encuestas y entrevistas. También, se destacan evaluaciones directas de los componentes de los agroecosistemas y la combinación de múltiples técnicas en un mismo estudio debido a la complejidad del tema (Pinto-Correia et

al., 2018; Stokes et al., 2023). Un 10% de las investigaciones se basa exclusivamente en datos secundarios.

El 20% de los estudios utiliza análisis multicriterio para la toma de decisiones, especialmente el Proceso Jerárquico Analítico (AHP), para evaluar la MF en sistemas agrícolas variados (Parra-López, Calatrava-Requena and De-Haro-Giménez, 2008; Arriaza and Gómez-Limón, 2011; Marques-Perez and Segura, 2018; Rodríguez Sousa et al., 2020; Tran et al., 2022).

Los trabajos resaltan la necesidad de comprender cómo las diversas funciones de los agroecosistemas interactúan (Willemen et al., 2010; Marsboom et al., 2018) y cómo pueden ser fomentadas, considerando el efecto de las externalidades y seleccionando de manera cuidadosa los indicadores y escalas de análisis al diseñar políticas relacionadas con los agroecosistemas (Stürck and Verburg, 2017; Torralba et al., 2018; Jiang et al., 2020; Rodríguez Sousa et al., 2020). Asimismo, se enfatiza la importancia de incluir a múltiples partes interesadas en la toma de decisiones, considerando los desafíos de la MF agrícola. Entre los principales retos identificados en esta revisión se encuentran el equilibrio entre biodiversidad y rendimiento, la diversidad en la valoración de servicios ecosistémicos, la falta de una definición y métodos de evaluación consistentes que dificulta la comparación entre estudios y la toma de decisiones informadas, la complejidad en la interacción de funciones del paisaje y la falta de integración de los efectos del cambio climático en la planificación del uso del suelo (Willemen et al., 2010; Mastrangelo et al., 2014; Hölting et al., 2020; Ren, 2021; Daelemans et al., 2023). Sin duda, un enfoque integrador es clave para el desarrollo de estrategias sostenibles que consideren los aspectos socioeconómicos y ecológicos de los agroecosistemas.

Grupo 2. Evaluación de la multifuncionalidad de los agroecosistemas según su biodiversidad

En el ámbito de la ecología contemporánea, se ha intensificado el interés por comprender cómo la biodiversidad afecta la MF en diferentes agroecosistemas.

La importancia crítica de la biodiversidad microbiana del suelo para la productividad agrícola y la eficiencia de los agroecosistemas se ha destacado, especialmente en el contexto de la intensificación agrícola y el uso de fertilizantes químicos (Romero et al., 2023).

Además, los ecosistemas costeros tropicales han sido objeto de estudio, mostrando la sinergia entre vegetación, suelo y diversidad microbiana para mantener servicios ecosistémicos, especialmente en bosques y manglares (Velmurugan et al., 2022). Por otro lado, en los pastizales, se ha investigado cómo la beta-diversidad de plantas y microorganismos del suelo afecta a las funciones ecosistémicas, revelando un mayor impacto de la diversidad de plantas en la variabilidad de la función del ecosistema en comparación con la diversidad microbiana del suelo (Jing et al., 2021).

Desde una perspectiva agronómica, se ha examinado cómo los policultivos en sistemas agrícolas con variedad de nichos pueden ser más importante para el funcionamiento del ecosistema que la simple riqueza de especies, sugiriendo que el diseño de policultivos para maximizar la diversidad funcional podría llevar a agroecosistemas más eficientes (Finney and Kaye, 2017). Las investigaciones también se han enfocado en las consecuencias de la pérdida de biodiversidad, destacando el papel crítico de las especies arbóreas en los servicios ecosistémicos y la necesidad de proteger su diversidad para asegurar un suministro sostenible de estos servicios (Tekalign et al., 2017).

Finalmente, se ha ofrecido una visión general sobre la importancia de la biodiversidad para el funcionamiento global del ecosistema. Esta visión sugiere que la complementariedad entre especies es crucial para la resiliencia y estabilidad de los ecosistemas, y que el funcionamiento general es más susceptible a la pérdida de especies que las funciones individuales, resaltando la relevancia de la biodiversidad a nivel microbiano y de especies en la promoción de la MF del agroecosistema (Gamfeldt, Hillebrand and Jonsson, 2008; Romero et al., 2023).

Grupo 3. Evaluación de la multifuncionalidad del suelo en agroecosistemas

Entre las investigaciones catalogadas en este tercer grupo, destacan los resultados que se detallan a continuación, los cuales subrayan la estrecha relación entre la vitalidad de los agroecosistemas y su capacidad para proporcionar servicios ecosistémicos, con prácticas de manejo del suelo que a su vez afectan la biodiversidad. Según Li et al. (2023), el uso de estiércol en zonas subtropicales mejora la salud del suelo y eleva la funcionalidad microbiana, impulsando la biomasa microbiana, la disponibilidad de nutrientes y la actividad enzimática. Este hallazgo se complementa con la investigación de Nazaries et al. (2021), quienes señalan que tanto la estructura de la comunidad microbiana como los factores abióticos son fundamentales para regular las funciones del suelo, destacando la importancia de la biodiversidad microbiana para potenciar la MF del suelo.

En un contexto más amplio, Zhao et al. (2021) enfatizan la importancia estratégica del suelo para la seguridad alimentaria y advierten sobre los riesgos de su sobreexplotación. Los autores subrayan la necesidad de un manejo equilibrado del suelo para lograr la seguridad alimentaria sin comprometer otras funciones esenciales. En esta línea, Taniguchi et al. (2022) exploran cómo la biodiversidad del suelo y prácticas de manejo sostenible están interconectadas, incidiendo directamente en la salud y sostenibilidad de los agroecosistemas. Además, el estudio de Yang et al. (2023) mostró que los fertilizantes de nitrógeno de alta eficiencia (EENF) mejoran la fertilidad del suelo en regiones semiáridas, ayudando a mitigar las limitaciones de nutrientes y a conservar la calidad del suelo. Sus resultados apoyan la teoría de que las actividades enzimáticas y el metabolismo microbiano dependen más de los nutrientes del suelo que de las comunidades microbianas, y que la aplicación de fertilizantes nitrogenados (N200 y EENF) podrían influir en la transformación de C, N y P en el suelo.

La evaluación integral de la calidad del suelo se ha convertido en un aspecto central, con herramientas como los índices multivariados, que permiten comprender y monitorear las interacciones complejas en el suelo. Angelini, Heuvelink and Lagacherie (2023) ejemplifican esto con un estudio en el sur de Francia, donde se utilizó un índice de MF potencial del suelo para diferentes usos agrícolas. Además, Zwetsloot et al. (2022) resaltan la importancia de BIOSIS, una plataforma para seleccionar métodos biológicos del suelo, facilitando el seguimiento de su funcionalidad en la agricultura.

En adición, se ha observado que los indicadores superficiales del suelo mantienen una correlación significativa con la MF del suelo en áreas secas a nivel global, ofreciendo métodos simples y efectivos para monitorear la MF del suelo en tiempo real, especialmente en condiciones de cambio en el uso de la tierra y factores ambientales (Eldridge et al., 2020). Por último, la conexión identificada entre los servicios del ecosistema en tierras de cultivo y la composición taxonómica y funcional del microbioma del suelo subraya la relevancia de la fertilización orgánica para mejorar diversos servicios del ecosistema en entornos agrícolas (Chen et al., 2019).

En resumen, la investigación en la evaluación de la MF de agroecosistemas se está consolidando como un ámbito de interés global, diverso y multidisciplinario. Los enfoques metodológicos están evolucionando hacia técnicas más integradoras y holísticas, lo que refleja una creciente comprensión de la complejidad y la relevancia de estos sistemas para el desarrollo sostenible. Este campo emergente promete desempeñar un papel significativo en la configuración de políticas y prácticas agrícolas sostenibles y resilientes, adaptadas a los retos del Antropoceno.

3.6. Conclusiones

La investigación en el campo de la evaluación de la MF en agroecosistemas ha mostrado un crecimiento y una evolución significativos, especialmente en los últimos siete años. Este crecimiento se refleja en el volumen de estudios y

publicaciones, así como en la expansión geográfica de la investigación, particularmente en Europa y Asia, con un enfoque destacado en China. La revisión bibliométrica permitió identificar una diversificación en los enfoques metodológicos y en la procedencia de los autores, lo que sugiere un interés creciente por una comprensión más integral de la MF en los agroecosistemas. Esta evolución se manifiesta en la variabilidad de términos recurrentes y en el uso de diferentes escalas de análisis, con mayor interés por abarcar el contexto ecológico y enseguida el socioeconómico en la evaluación de la MF, según el mapa bibliométrico, la temática de las revistas de las publicaciones y la frecuencia de términos, resultantes de esta revisión.

En cuanto a las áreas temáticas de investigación, destacan tres enfoques principales: la evaluación multidimensional de agroecosistemas, la evaluación basada en la biodiversidad y la evaluación enfocada en la MF del suelo. El primer enfoque requiere de bases de datos amplias y técnicas sofisticadas, dada la amplitud de las áreas de estudio, que a menudo incluyen regiones enteras o países. Estas metodologías han evolucionado para incorporar análisis espacial, modelado y análisis multicriterio, reflejando una preferencia por enfoques integrales que consideran múltiples variables y dimensiones de la MF. Las otras dos áreas, aunque más focalizadas, son igualmente críticas, ya que implican la recopilación de datos de campo detallados y la observación cercana de los agroecosistemas y sus alrededores.

3.7. Literatura citada

- Angelini, M. E., Heuvelink, G. B. M., & Lagacherie, P. (2023). A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern France. *European Journal of Soil Science*, 74, Article e13345. <https://doi.org/10.1111/ejss.13345>
- Arriaza, M., & Gómez-Limón, J. A. (2011). Valoración social del carácter multifuncional de la agricultura andaluza. *Informacion Tecnica Economica Agraria*, 107(2), 102–125.
- Balzan, M. V., Caruana, J., & Zammit, A. (2018). Assessing the capacity and flow of ecosystem services in multifunctional landscapes: Evidence of a rural-urban gradient in a Mediterranean small island state. *Land Use Policy*, 75, 711–725. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.025>

- Biswas, B., Chakraborty, D., Timsina, J., Bhowmick, U. R., Dhara, P. K., Ghosh (Lkn), D. K., Sarkar, A., Mondal, M., Adhikary, S., Kanthal, S., Patra, K., Sarkar, S., Parsad, R., & Ray, B. R. (2022). Agroforestry offers multiple ecosystem services in degraded lateritic soils. *Journal of Cleaner Production*, 365, Article 132768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132768>
- Boyack, K. W., & Klavans, R. (2010). Co-Citation Analysis, Bibliographic Coupling, and Direct Citation: Which Citation Approach Represents the Research Front Most Accurately? *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 61(12), 2389–2404.
- Chen, L., Redmile-Gordon, M., Li, J., Zhang, J., Xin, X., Zhang, C., Ma, D., & Zhou, Y. (2019). Linking cropland ecosystem services to microbiome taxonomic composition and functional composition in a sandy loam soil with 28-year organic and inorganic fertilizer regimes. *Applied Soil Ecology*, 139, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.011>
- Crossman, N. D., & Brett A., B. (2009). Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality. *Ecological Economics*, 68(3), 654–668. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.003>
- Daelemans, R., Hulsmans, E., Fockaert, L., Vranken, L., De Bruyn, L., & Honnay, O. (2023). Agroecosystem multifunctionality of apple orchards in relation to agricultural management and landscape context. *Ecological Indicators*, 154, Article 110496. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110496>
- Eldridge, D. J., Delgado-baquerizo, M., Quero, J. L., Ochoa, V., Gozalo, B., García-palacios, P., Escolar, C., García-Gómez, M., Prina, A., Bowker, M. A., Bran, D. E., Castro, I., Cea, A., Derak, M., Espinosa, C. I., Florentino, A., Gaitán, J. J., Gatica, G., Gómez-González, S., ... Maestre, F. T. (2020). Surface indicators are correlated with soil multifunctionality in global drylands. *Journal of Applied Ecology*, 57, 424–435. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13540>
- Fagioli, F. F., Rocchi, L., Paolotti, L., Słowiński, R., & Boggia, A. (2017). From the farm to the agri-food system: A multiple criteria framework to evaluate extended multi-functional value. *Ecological Indicators*, 79, 91–102. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.04.009>
- FAO, O. de las N. U. para la A. y la A. (2022). El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022. Aprovechar la automatización de la agricultura para transformar los sistemas agroalimentarios. <https://doi.org/10.4060/cb9479es>
- Finney, D. M., & Kaye, J. P. (2017). Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 509–517. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12765>
- Fleskens, L., Duarte, F., & Eicher, I. (2009). A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves. *Journal of Rural Studies*, 25(1), 141–155. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2008.08.003>

- Gamfeldt, L., Hillebrand, H., & Jonsson, P. R. (2008). Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning. *Ecology*, 89(5), 1223–1231. <https://doi.org/10.1890/06-2091.1>
- Garland, G., Banerjee, S., Edlinger, A., Miranda Oliveira, E., Herzog, C., Wittwer, R., Philippot, L., Maestre, F. T., & van der Heijden, M. G. A. (2021). A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review. *Journal of Ecology*, 109, 600–613. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13511>
- Hodobod, J., Barreteau, O., Allen, C., & Magda, D. (2016). Managing adaptively for multifunctionality in agricultural systems. *Journal of Environmental Management*, 183, 379–388. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.064>
- Hölting, L., Beckmann, M., Volk, M., & Cord, A. F. (2019). Multifunctionality assessments – More than assessing multiple ecosystem functions and services? A quantitative literature review. *Ecological Indicators*, 103, 226–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.009>
- Hölting, L., Komossa, F., Filyushkina, A., Gastinger, M.-M., Verburg, P. H., Beckmann, M., Volk, M., Cord, A. F., Verburg, P. H., Beckmann, M., Volk, M., & Including, A. F. C. (2020). Including stakeholders' perspectives on ecosystem services in multifunctionality assessments. *Ecosystems and People*, 16(1), 354–368. <https://doi.org/10.1080/26395916.2020.1833986>
- Jiang, G., Wang, M., Qu, Y., Zhou, D., & Ma, W. (2020). Towards cultivated land multifunction assessment in China: Applying the “influencing factors-functions-products-demands” integrated framework. *Land Use Policy*, 99, Article 104982. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104982>
- Jing, X., Prager, C. M., Borer, E. T., Gotelli, N. J., Gruner, D. S., He, J.-S., Kirkman, K., MacDougall, A. S., McCulley, R. L., Prober, S. M., Seabloom, E. W., Stevens, C. J., Classen, A. T., & Sanders, N. J. (2021). Spatial turnover of multiple ecosystem functions is more associated with plant than soil microbial β -diversity. *Ecosphere*, 12(7), Article e03644. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3644>
- Leroux, L., Clermont-Dauphin, C., Ndiénor, M., Jourdan, C., Roupsard, O., & Seghier, J. (2022). A spatialized assessment of ecosystem service relationships in a multifunctional agroforestry landscape of Senegal. *Science of the Total Environment*, 853, Article 158707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158707>
- Li, X., Qiao, L., Huang, Y., Li, D., Xu, M., Ge, T., Meersmans, J., & Zhang, W. (2023). Manuring improves soil health by sustaining multifunction at relatively high levels in subtropical area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 353, Article 108539. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108539>
- Lin, H., & Yun, H. (2023). Spatiotemporal Dynamics of Ecosystem Services Driven by Human Modification over the Past Seven Decades: A Case Study of Sihui Agricultural Watershed, China. *Land*, 12, Article 577. <https://doi.org/10.3390/land12030577>
- Lovell, S. T., Mendez, V. E., Erickson, D. L., Nathan, C., & DeSantis, S. (2010). Extent, pattern, and multifunctionality of treed habitats on farms in

- Vermont, USA. *Agroforestry Systems*, 80, 153–171. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9328-5>
- Marques-Perez, I., & Segura, B. (2018). Integrating social preferences analysis for multifunctional peri-urban farming in planning. An application by multi-criteria analysis techniques and stakeholders. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(9), 1029–1057. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1468379>
- Marsboom, C., Vreboos, D., Staes, J., & Meire, P. (2018). Using dimension reduction PCA to identify ecosystem service bundles. *Ecological Indicators*, 87, 209–260. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2017.10.049>
- Mastrangelo, M. E., Weyland, F., Villarino, S. H., Barral, M. P., Nahuelhual, L., & Lateral, P. (2014). Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29, 345–358. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9959-9>
- Moon, W. (2015). Conceptualising multifunctional agriculture from a global perspective: Implications for governing agricultural trade in the post-Doha Round era. *Land Use Policy*, 49, 252–263. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.07.026>
- Nazaries, L., Pal Singh, B., Rani Sarker, J., Fang, Y., Klein, M., & Singh, B. K. (2021). The response of soil multi-functionality to agricultural management practices can be predicted by key soil abiotic and biotic properties. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 307, Article 107206. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107206>
- Parra-López, C., Calatrava-Requena, J., & De-Haro-Giménez, T. (2008). A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework. *Ecological Economics*, 64(4), 820–834. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.004>
- Peralta González, M. J., Frías Guzmán, M., & Gregorio Chaviano, O. (2015). Criterios, clasificaciones y tendencias de los indicadores bibliométricos en la evaluación de la ciencia. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, 26(3), 290–309. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-21132015000300009&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Perianes-Rodríguez, A., Waltman, L., & van Eck, N. J. (2016). Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. *Journal of Informetrics*, 10, 1178–1195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joi.2016.10.006>
- Pinto-Correia, T., Guimar, N., Ferraz-de-Oliveira, M. I., Sales-Baptista, E., Rabaça, J., Godinho, C., Ribeiro, N., Sá Sousa, P., Santos, P., Santos-Silva, C., Simões, M. P., Belo, A. D. F., Catarino, L., Costa, P., Fonseca, E., Godinho, S., Azeda, C., Almeida, M., Gomes, L., ... Vaz, M. (2018). Progress in Identifying High Nature Value Montados: Impacts of Grazing on Hardwood Rangeland Biodiversity. *Rangeland Ecology and Management*, 71(5), 612–625. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.01.004>

- Pranckutė, R. (2021). Web of Science (WoS) and Scopus: the titans of bibliographic information in today's academic world. *Publications*, 9, Article 12. <https://doi.org/10.3390/publications9010012>
- Rac, I., Erjavec, K., & Erjavec, E. (2023). Agriculture and environment: friends or foes? Conceptualising agri-environmental discourses under the European Union's Common Agricultural Policy. *Agriculture and Human Values*, 41, 147–166. <https://doi.org/10.1007/s10460-023-10474-y>
- Ren, K. (2021). Following Rural Functions to Classify Rural Sites: An Application in Jixi, Anhui Province, China. *Land*, 10, Article 418. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/land10040418>
- Richter, F., Jan, P., El Benni, N., Lüscher, A., Buchmann, N., & Klaus, V. H. (2021). A guide to assess and value ecosystem services of grasslands. *Ecosystem Services*, 52, Article 101376. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101376>
- Rodríguez Sousa, A. A., Parra-lópez, C., Sayadi-Gmada, S., Barandica, J. M., & Rescia, A. J. (2020). A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using the Analytic Hierarchy Process. *Ecological Economics*, 173, Article 106658. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106658>
- Rodríguez-Loinaz, G., Alday, J. G., & Onaindia, M. (2015). Multiple ecosystem services landscape index: A tool for multifunctional landscapes conservation. *Journal of Environmental Management*, 147, 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.001>
- Romero, F., Hilfiker, S., Edlinger, A., Held, A., Hartman, K., Labouyrie, M., & van der Heijden, M. G. A. (2023). Soil microbial biodiversity promotes crop productivity and agro-ecosystem functioning in experimental microcosms. *Science of the Total Environment*, 885, Article 163683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163683>
- Salatino, M. (2022). Los circuitos lingüísticos de la publicación científica latinoamericana. *Tempo Social*, 34(3), 253–273. <https://doi.org/10.11606/0103-2070.ts.2022.201928>
- Stokes, A., Bocquého, G., Carrere, P., Conde Salazar, R., Deconchat, M., Garcia, L., Gardarin, A., Gary, C., Gaucherel, C., Gueye, M., Hedde, M., Lescourret, F., Mao, Z., Quérrou, N., Rudi, G., Salles, J.-M., Soubeyran, R., Subervie, J., Vialatte, A., ... Thomas, M. (2023). Services provided by multifunctional agroecosystems: Questions, obstacles and solutions. *Ecological Engineering*, 191, Article 106949. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106949>
- Stürck, J., & Verburg, P. H. (2017). Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. *Landscape Ecology*, 32, 481–500. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0459-6>
- Tanács, E., Vári, Á., Bede-Fazekas, Á., Báldi, A., Csákvári, E., Endrédi, A., Fabók, V., Kisné Fodor, L., Kiss, M., Koncz, P., Kovács-Hostyánszki, A., Mészáros, J., Pásztor, L., Rezneki, R., Standovár, T., Zsembergy, Z., & Török, K. (2023). Finding the Green Grass in the Haystack? Integrated National Assessment of Ecosystem Services and Condition in Hungary, in

- Support of Conservation and Planning. *Sustainability*, 15, Article 8489. <https://doi.org/10.3390/su15118489>
- Taniguchi, T., Akaji, Y., Yamato, M., Kusakabe, R., Goomaral, A., Undarmaa, J., & Yamanaka, N. (2022). Dominance of arbuscular mycorrhizal fungi is key for Mongolian steppe management under livestock grazing, as indicated by ecosystem multifunctionality. *Ecological Indicators*, 136, Article 108686. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108686>
- Tekalign, M., Van Meerbeek, K., Aerts, R., Norgrove, L., Poesen, J., Nyssen, J., & Muys, B. (2017). Effects of biodiversity loss and restoration scenarios on tree-related ecosystem services. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 13(1), 434–443. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1399929>
- Torralba, M., Oteros-Rozas, E., Moreno, G., & Plieninger, T. (2018). Exploring the Role of Management in the Coproduction of Ecosystem Services from Spanish Wooded Rangelands. *Rangeland Ecology and Management*, 71(5), 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2017.09.001>
- Tran, D. X., Pearson, D., Palmer, A., Gray, D., Lowry, J., & Dominati, E. J. (2022). A comprehensive spatially-explicit analysis of agricultural landscape multifunctionality using a New Zealand hill country farm case study. *Agricultural Systems*, 203, Article 103494. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103494>
- Valujeva, K., O'Sullivan, L., Gutzler, C., Fealy, R., & Schulte, R. P. O. (2016). The challenge of managing soil functions at multiple scales: An optimisation study of the synergistic and antagonistic trade-offs between soil functions in Ireland. *Land Use Policy*, 58, 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.028>
- van der Plas, F., Allan, E., Fischer, M., Alt, F., Arndt, H., Binkenstein, J., Blaser, S., Blüthgen, N., Böhm, S., Hölzel, N., Klaus, V. H., Kleinebecker, T., Morris, K., Oelmann, Y., Prati, D., Renner, S. C., Rillig, M. C., Schaefer, H. M., Schlöter, M., ... Manning, P. (2019). Towards the development of general rules describing landscape heterogeneity–multifunctionality relationships. *Journal of Applied Ecology*, 56, 168–179. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13260>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vazquez, C., de Goede, R. G. M., Rutgers, M., de Koeijer, T. J., & Creamer, R. E. (2021). Assessing multifunctionality of agricultural soils: Reducing the biodiversity trade-off. *European Journal of Soil Science*, 72, 1624–1639. <https://doi.org/10.1111/ejss.13019>
- Velmurugan, A., Swarnam, T. P., Jaisankar, I., Swain, S., & Subramani, T. (2022). Vegetation–soil–microbial diversity influences ecosystem multifunctionality across different tropical coastal ecosystem types. *Tropical Ecology*, 63, 273–285. <https://doi.org/10.1007/s42965-021-00209-7>
- Waltman, L., & van Eck, N. J. (2012). A New Methodology for Constructing a Publication-Level Classification System of Science. *Journal of the*

- American Society for Information Science and Technology*, 63(12), 2378–2392. <https://doi.org/10.1002/asi.22748>
- Willemen, L., Hein, L., van Mensvoort, M. E. F., & Verburg, P. H. (2010). Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region. *Ecological Indicators*, 10(1), 62–73. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2009.02.015>
- Willemen, L., Verburg, P. H., Hein, L., & van Mensvoort, M. E. F. (2008). Spatial characterization of landscape functions. *Landscape and Urban Planning*, 88(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.004>
- Yang, R., Yang, Z., Yang, S., Chen, L., Xin, J., Xu, L., Zhang, X., Zhai, B., Wang, Z., Zheng, W., & Li, Z. (2023). Nitrogen inhibitors improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial nitrogen limitation. *Science of the Total Environment*, 880, Article 163238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163238>
- Zhao, R., Li, J., Wu, K., & Kang, L. (2021). Cultivated Land Use Zoning Based on Soil Function Evaluation from the Perspective of Black Soil Protection. *Land*, 10, Article 605. <https://doi.org/10.3390/land10060605>
- Zinchuk, T., Kutsmus, N., Prokopchuk, O., Lagodiienko, V., Nych, T., & Naumko, Y. (2021). Multifunctionality of Agriculture in the Reality of Globalization Crisis. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22(1), 51–59. <https://doi.org/10.12912/27197050/132094>
- Zwetsloot, M. J., Bongiorno, G., Barel, J. M., di Lonardo, D. P., & Creamer, R. E. (2022). A flexible selection tool for the inclusion of soil biology methods in the assessment of soil multifunctionality. *Soil Biology and Biochemistry*, 166, Article 108514. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108514>

CAPÍTULO 4. INTERPRETACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD EN LA EVALUACIÓN DE AGROECOSISTEMAS⁴

4.1. Resumen

La multifuncionalidad de los agroecosistemas ha evolucionado a lo largo de las últimas décadas, desde que se incorporó a la agenda mundial. En los últimos años, la investigación sobre su evaluación ha aumentado, aunque con metodologías, indicadores e interpretaciones variables. Este estudio analiza la aplicación del concepto de multifuncionalidad asociada con agroecosistemas, sus metodologías e indicadores de evaluación a través de una revisión de artículos en Scopus y Web of Science. Los resultados muestran una creciente integración del concepto de servicios ecosistémicos, destacando su entrega simultánea. Predominan las metodologías mixtas, con prioridad en el uso de indicadores ambientales. Las diferencias en la aplicación del concepto de multifuncionalidad influyen en la profundidad y alcance de las evaluaciones. La variabilidad en términos asociados se puede explicar por las diversas perspectivas de análisis, como el sector, disciplina o formación de los investigadores y usuarios del concepto.

4.2. Abstract

The multifunctionality of agroecosystems has evolved over the last decades since it was incorporated into the global agenda. In recent years, research on their evaluation has increased, albeit with varying methodologies, indicators, and interpretations. This study analyzes the application of the concept of multifunctionality associated with agroecosystems, its methodologies, and evaluation indicators through a review of articles in Scopus and Web of Science. The results show a growing integration of the concept of ecosystem services, highlighting their simultaneous delivery. Mixed methodologies predominate with priority given to the use of environmental indicators. Differences in applying the

⁴ Sometido: Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros.
Estatus: publicado.

concept of multifunctionality influence the depth and scope of evaluations. The variability in associated terms can be explained by the different analytical perspectives, such as the sector, discipline, or background of the researchers and users of the concept.

4.3. Introducción

El análisis de la multifuncionalidad (MF) agrícola o de los agroecosistemas se remonta a la década de 1990, cuando comenzaron a cuestionarse los modelos productivos centrados exclusivamente en la producción de alimentos (Moon, 2015). Esta evolución conceptual también se refleja en la terminología utilizada, destacando la incorporación de la expresión agroecosistema, ampliamente difundida en el ámbito académico para referirse a la evaluación de la MF de sistemas agrícolas. Aunque persiste el debate en la comunidad científica respecto a su aplicación, en esta investigación se parte de la acepción más básica de agroecosistema como sistema de producción, es decir, áreas destinadas principalmente a la producción de alimentos (de origen vegetal o animal), materias primas o combustibles. Sin embargo, se reconoce que los agroecosistemas deben entenderse como sistemas complejos que generan diversos servicios ecosistémicos, resultado de la interacción entre componentes bióticos, abióticos y sociales (Liu et al., 2022; Nicholls et al., 2015).

Estas interacciones abarcan dimensiones ecológicas, económicas, culturales, políticas y otras formas de participación humana, que reflejan las decisiones, racionalidades y conocimientos de los actores involucrados (Casanova et al., 2016; Gallardo-López et al., 2021; Melgarejo et al., 2021). En ese sentido, los servicios ecosistémicos (se presentan solo algunos ejemplos) que proveen los agroecosistemas se clasifican en servicios de apoyo (formación del suelo o el ciclo de nutrientes), de aprovisionamiento (alimentos, agua potable, recursos genéticos), de regulación (regulación climática, control de enfermedades, polinización) y culturales (valores espirituales, identidad cultural, ecoturismo), según lo presentado en la Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005). La

provisión de estos servicios está condicionada tanto por el entorno natural como por factores históricos y sociales.

De acuerdo con lo anterior, el enfoque de la MF en la agricultura visibiliza un alcance amplio para incluir la diversidad de servicios que esta actividad presta a la sociedad (Zhang et al., 2023). En otras palabras, se reconoce que la agricultura implica múltiples interacciones socioecológicas cuyos resultados van más allá de la simple producción de alimentos o materias primas (Rodríguez Sousa et al., 2020). En esta investigación se plantea que la MF debe entenderse como la capacidad de los agroecosistemas para proveer simultáneamente diversos servicios ecosistémicos y que se deben tomar en cuenta los efectos positivos y/o negativos en su evaluación.

El interés por el paradigma de la agricultura multifuncional se incrementa cada vez más pues se asocia con la transición hacia sistemas agroalimentarios más resilientes, inclusivos y sostenibles (Murphy et al., 2023). La incorporación de tales propiedades representa una forma de atención a los problemas que afectan a los sistemas productivos, como el cambio climático, la migración y otras dinámicas globales (FAO, 2022; Stokes et al., 2023).

En este contexto, diversos actores sociales promueven el cambio hacia sistemas agrícolas más multifuncionales, los cuales, en un escenario ideal, deberían proporcionar servicios de aprovisionamiento, regulación, apoyo y culturales, dentro de límites socioeconómicos viables (Wittwer et al., 2021). Sin embargo, debido a la variedad de configuraciones, escalas y contextos de los agroecosistemas, la provisión de servicios varía entre unidades de producción, dando lugar a diferentes niveles o grados de multifuncionalidad (Moon, 2015; Stokes et al., 2023).

A pesar del reconocimiento creciente de la MF en la agricultura, su comprensión e interpretación continúan presentando ambigüedades. Diversos autores han señalado la falta de consenso respecto a las funciones o servicios que definen de manera universal este carácter multifuncional (Huang et al., 2015; Moon,

2015; Nowack et al., 2022; Zhang et al., 2023). Esta falta de claridad conceptual también se refleja en la diversidad de métodos, indicadores o variables empleadas para evaluar la MF de los agroecosistemas. Bajo este contexto, es de suma importancia identificar los contextos de aplicación del concepto de MF y sus alcances cuando se estudian los agroecosistemas bajo el paradigma de la agricultura multifuncional.

Con base en esta necesidad, en el presente estudio se plantearon los objetivos siguientes: 1) analizar la interpretación de MF en investigaciones que realizaron la evaluación de agroecosistemas; 2) describir las evaluaciones realizadas de agroecosistemas a través de la identificación de los tipos de metodologías e indicadores utilizados. La atención de los dos objetivos se sustentó en la revisión de literatura científica que se encuentra en bases de datos, según se explica en el apartado siguiente.

4.4. Metodología

En primer lugar, se realizaron pruebas exploratorias en bases de datos científicas mediante distintas combinaciones de términos clave relacionados con la evaluación de agroecosistemas desde la perspectiva de la MF de los sistemas de producción agrícola. A partir de los ejercicios que ofrecieron resultados en línea con el tema de interés, se definieron las palabras clave utilizadas en las siguientes fórmulas de búsqueda.

Scopus: TITLE-ABS-KEY ((multifunctio* OR "multi-functio*" OR "multiple functio*") AND (agricultu* OR agroecosystem* OR "agro-ecosystem*") AND (assess* OR evalua* OR measu* OR analy* OR quant* OR valua*) AND (indicator* OR criteria OR variable OR index* OR factor*)) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENVI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")).

Web of Science: TS=((multifunctio* OR "multi functional*" OR "multiple function*") AND (agricultu* OR agroecosystem* OR "agro ecosystem*") AND (assess* OR

evalua* OR measu* OR analy* OR quant* OR valua*) AND (indicator* OR criteria OR variable OR index* OR factor*)).

En ambas bases de datos, la búsqueda se limitó a artículos científicos dentro de las áreas de investigación de ciencias ambientales y agricultura, considerando el periodo comprendido desde el primer registro disponible hasta el año 2024.

Los resultados obtenidos fueron depurados para eliminar duplicados entre bases de datos. Posteriormente, se realizó la revisión de los resúmenes con el fin de seleccionar únicamente aquellos estudios relacionados con la evaluación de la MF de agroecosistemas. Estos trabajos fueron descargados para su lectura detallada. Como resultado, se identificaron 94 estudios que reportan explícitamente indicadores (o sus equivalentes) empleados en la evaluación de agroecosistemas.

La revisión del concepto de multifuncionalidad se realizó a partir de una muestra de los artículos más citados y otra de los más recientes (Cuadro 3). Con base en este análisis, se exploró la interpretación del concepto, cuyos resultados se presentan en el apartado 4.5.1 de este documento.

La información referente a los sistemas evaluados, las metodologías empleadas y los indicadores analizados fue sistematizada en una base de datos elaborada en Excel. A partir de esta base, se calcularon los porcentajes y las tablas que se presentan en la sección de resultados y discusión. Además, con el propósito de ilustrar visualmente los indicadores más utilizados en las evaluaciones, se generó una nube de palabras a partir de una muestra de estos.

4.5. Resultados y discusión

La revisión de los 94 artículos científicos sobre la evaluación de la MF de agroecosistemas permitió identificar, según las metodologías aplicadas en las investigaciones, dos enfoques principales que a continuación se explican. Un grupo que representa el 43% de los manuscritos, se centró en superficies con diversos usos de la tierra. En estos estudios, las áreas evaluadas combinaban

sistemas de producción agropecuaria, vegetación natural y exótica, humedales, zonas urbanas y otros usos específicos. Tales estudios resaltan el papel de los agroecosistemas en relación con otras actividades. Debido a estas características, este conjunto de investigaciones se denominó, para los fines de esta revisión, como "Evaluación Multidimensional de Agroecosistemas" (EMDA).

Dadas las particularidades antes mencionadas, también se sugiere que este conjunto de investigaciones podría identificarse según el objeto de estudio, por ejemplo: evaluación de la MF de paisajes agrícolas, valuación de la MF de usos de la tierra o términos equivalentes, como así lo denominan en algunos de los trabajos incluidos en este grupo (Li et al., 2022; Xue et al., 2022; Seifert et al., 2024). Aunque en esta línea se incluyen evaluaciones que destacan a la agricultura como una actividad dentro de un conjunto de usos de la tierra, hay otras que profundizan en el papel de la actividad agrícola en el desarrollo rural o la multifuncionalidad de áreas circundantes. Estas observaciones se documentan en la presente revisión como una propuesta para considerarse en estudios futuros, cuya implementación podría facilitar la distinción de los alcances entre los diferentes tipos de evaluaciones de la MF relacionada con la agricultura. Es importante mencionar que los trabajos incluidos en este grupo se realizaron en superficies extensas, incluso abarcando un país o conjunto de países.

El restante 57% corresponde a investigaciones focalizadas en la actividad agrícola, pecuaria o agroforestal, que se identificaron como "Evaluación de la Multifuncionalidad de Agroecosistemas" (EMFA), las cuales se basaron en la biodiversidad o en las características del suelo y en algunos casos se trataron de evaluaciones orientadas a lo holístico de unidades de producción. En este grupo se incluyen desde microcosmos experimentales hasta estudios que se efectuaron a nivel de país.

En concreto, mediante la clasificación aplicada se separaron las evaluaciones enfocadas exclusivamente en agroecosistemas, de los estudios de diferentes usos de la tierra en conjunto, incluyendo agroecosistemas.

4.5.1. Interpretación de multifuncionalidad de agroecosistemas

Los resultados descritos muestran que el análisis de la MF puede ser aplicado a cualquier sistema de producción, área natural o de interés general (Huang et al., 2015). No obstante, el uso generalizado de este término ha generado diferentes interpretaciones (Stürck and Verburg, 2017), las cuales han evolucionado con el paso del tiempo. Tal situación se ha observado en los conceptos que forman parte de la MF. Por ejemplo, a finales de los años noventa, se propuso la redefinición de "recursos naturales" como "funciones naturales", al referirse a los bienes y servicios proporcionados por el entorno natural. Este cambio destaca la importancia de los elementos naturales como componentes esenciales de sistemas complejos, vitales para la existencia humana, a la vez que se descarta el término "recurso", que connota una perspectiva de tipo económica (de Groot, 1987).

En relación con lo anterior, se observa que la identificación de los grupos EMDA y EMFA, tiene asociación con lo documentado por Huang et al. (2015), quienes concluyeron que existen dos comunidades científicas estrechamente relacionadas por el uso del término "función" pero que operan de forma independiente. Según los autores, una es la que estudia la agricultura multifuncional centrada en la actividad agrícola que correspondería a la EMFA de esta investigación; y la otra se enfoca en los servicios ecosistémicos que se asemeja a las evaluaciones clasificadas como EMDA. Sin embargo, en el presente trabajo se encontró que, en las publicaciones más recientes, existe la tendencia de referirse a los servicios ecosistémicos como parte del concepto de MF para cualquier sistema, incluidos los enfocados en la producción (Cuadro 3). Esto sugiere un reconocimiento más amplio de que la actividad agropecuaria debe considerar sus efectos sobre las funciones del sistema y sus externalidades desde diversas perspectivas. A partir del análisis realizado sobre la MF, en este

trabajo de revisión se defiende que tanto el sentido positivo como el negativo son necesarios para un análisis integral orientado a lo holístico; por lo tanto, cuando se realice una evaluación, los sistemas que se aproximan a la MF deseada sean aquellos que maximizan los efectos positivos sobre los negativos.

Los argumentos anteriores representan un avance a lo encontrado hace varios años por Andersen et al., (2013) sobre como la concepción de MF de la agricultura mostraba un sentido positivista, cuando se hace énfasis en las funciones o servicios que son percibidos como buenos o que aportan a la demanda de la sociedad, pero sin hacer mayor análisis sobre los efectos negativos ocurridos durante el manejo del sistema. Esta y otras interpretaciones del concepto de interés se detallan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Interpretación de MF de agroecosistemas.		
Referencia	Título de la publicación	Interpretación de MF
Willemen et al., 2010*	Space for people, plants, and livestock? Quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region	Provisión de diferentes bienes y servicios
Crossman & Bryan, 2009*	Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality	Provisión de una gran cantidad de funciones relacionadas con la prosperidad y la sostenibilidad social, económica y ambiental Capacidad de un paisaje para proporcionar una variedad de servicios ecosistémicos, independientemente de su valor de mercado, considerando todos los servicios como de igual importancia
Rodríguez-Loinaz et al., 2015*	Multiple ecosystem services landscape index: A tool for multifunctional landscapes conservation	
Stürck & Verburg, 2017*	Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change	Provisión de múltiples servicios ecosistémicos
Parra-López et al., 2008*	A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of	Las múltiples funciones y roles que desempeña la agricultura, más allá de la producción de

Referencia	Título de la publicación	Interpretación de MF
	alternative olive systems in Spain within an AHP-extended framework	alimentos, incluyendo aspectos económicos, ambientales, sociales y culturales
Andersen et al., 2013*	An indicator-based method for quantifying farm multifunctionality	Provisión de funciones de manera equilibrada
Alignier et al., 2024**	Assessing cropping system multifunctionality: An analysis of trade-offs and synergies in French cereal fields	Funciones más allá de la producción de alimentos y contribución en la gestión de recursos, la conservación de la biodiversidad, el bienestar de los agricultores y los ciudadanos, el desarrollo rural y el empleo, la identidad cultural y el paisaje, etc.
Garba et al., 2024**	Optimizing ecosystem function multifunctionality with cover crops for improved agronomic and environmental outcomes in dryland cropping systems	Varias funciones ecosistémicas se proporcionan simultáneamente
Zhou et al., 2024**	Converted paddy to upland in saline-sodic land could improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial metabolism limitation	Realizar múltiples funciones simultáneamente
Lin & Yun, 2023**	Spatiotemporal Dynamics of Ecosystem Services Driven by Human Modification over the Past Seven Decades: A Case Study of Sihui Agricultural Watershed, China	Capacidad de los ecosistemas para proporcionar una variedad de servicios ecosistémicos
Yang et al., 2023**	Nitrogen inhibitors improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial nitrogen limitation	Provisión de múltiples funciones simultáneamente
Zhang et al., 2023**	The development of multifunctional agriculture in farming regions of China: Convergence or divergence?	La MF se representó mediante la función de suministro de productos agrícolas, la función económica, la función social y la función ecológica de los paisajes agrícolas.

*Artículos más citados y **artículos más recientes sobre evaluación de la MF.

Los artículos más citados que al mismo tiempo son de los primeros publicados, según esta revisión, utilizan las palabras, “provisión”, “capacidad”, “funciones”, “servicios” y especificaciones para algunos términos (por ejemplo, “funciones sociales”, “servicios ambientales”). En fechas más actuales, se incorporan las palabras “servicio ecosistémico” y “simultáneo” (y sus equivalentes); este último sugiere una forma de enfatizar que la existencia de las funciones o servicios ocurre en conjunto. A decir de varios autores, es necesario prestar mayor atención a la estrecha relación que guardan los fenómenos y sus interacciones tanto al interior del sistema como con su entorno cuando se investiga sobre estos temas (Moon, 2015; Garland et al., 2021; Stokes et al., 2023).

Con respecto a los términos utilizados, se observa que algunos investigadores utilizan palabras que confieren mayor claridad que otras, en la definición. Ejemplo de esto es el caso de “provisión” que tiene la connotación de que el sistema contiene o produce, mientras que “capacidad” denota que la producción o generación de “algo” puede cambiar, es decir, que los sistemas presentan ciertas propiedades o características que resultan en una menor o mayor MF. A partir de esto se propone que el término “capacidad” otorga mayor precisión que solo “provisión”. Derivado de lo anterior, se sugiere que la conjunción de ambos términos, es decir, “capacidad de provisión”, favorece en la claridad de la definición de MF.

Continuando con el uso de términos, algunos especialistas señalan que el concepto de MF agrícola se usa parcialmente, como sinónimo de diversificación agrícola, en cuyo caso los sistemas se vuelven multifuncionales tan pronto como se dedican a diversas actividades, además de la producción de alimentos (Nowack et al., 2022). De acuerdo con el razonamiento del párrafo anterior, estos casos estarían más alineados con el uso del término “provisión”.

Otros autores exponen la necesidad de diferenciar dos tipos de MF: 1) MF de la función del ecosistema y 2) MF del servicio del ecosistema (Manning et al., 2018;

Garland et al., 2021). La primera se refiere a la función de los procesos biológicos, geoquímicos y físicos dentro del ecosistema, mientras que la segunda corresponde al suministro simultáneo de múltiples servicios ecosistémicos (derivados de las propiedades y procesos de los ecosistemas) en relación con la demanda humana (Manning et al., 2018).

Por su parte, Hölting et al., (2019) hacen referencia a la escala, en su trabajo aplicaron los términos “alfa-multifuncionalidad” que definen como la diversidad de la oferta de servicios ecosistémicos a nivel municipal; y “beta-multifuncionalidad” cuando se trata de la contribución de los servicios ecosistémicos de cada municipio a la oferta regional de servicios ecosistémicos. Aunque ambos términos fueron utilizados para una superficie extensa, se considera que es necesario diferenciar la escala incluso en sitios de menores dimensiones, cuando se realiza la evaluación de la MF.

Otra consideración reiterada en las investigaciones es la estrecha relación que existe entre la MF y la sostenibilidad. Algunos autores refieren que la MF es una herramienta o un camino hacia la sostenibilidad (Rodríguez Sousa et al., 2020; Zhang et al., 2023) e indican que las evaluaciones de la MF son necesarias para identificar prácticas sostenibles en la agricultura (Ostandie et al., 2022).

De acuerdo con esta revisión, la definición de MF se encuentra influenciada por el sector, campo o formación de los usuarios del término e incluso los mismos términos que componen la definición pueden cambiar su interpretación. Esto se traslada a los alcances o profundidad de la evaluación o cuantificación de la MF de los agroecosistemas.

Los planteamientos antes descritos refieren que toda actividad productiva hace uso de las funciones ambientales vía los servicios ecosistémicos, siendo el ser humano quien realiza un uso más intensivo que otros seres vivos. En particular, la actividad agrícola está relacionada de manera sustancial con las funciones ambientales, dada la intervención directa que existe sobre los elementos

naturales para la consecución de la producción. En este sentido, los efectos positivos y negativos ocurren dentro de esa MF agrícola.

4.5.2. Evaluación de la multifuncionalidad de agroecosistemas

Como se describió en el apartado anterior, en el análisis de la MF se consideran elementos desde diferentes dimensiones, aspectos, funciones o servicios. A su vez, cada uno de estos se compone de categorías más específicas. En algunos trabajos se detallan varios niveles de desagregación; por ejemplo, tipo de servicio ecosistémico, subtipo de servicio ecosistémico, tipo de función y proxy o indicador (Alignier et al., 2024). Otro ejemplo con menos desagregación es categoría o tipo de función o servicio ecosistémico, subtipo de función y proxy o indicador (Ostandie et al., 2022; Garba et al., 2024). En varios de los trabajos recientes se muestra preocupación por justificar los *proxies* o indicadores utilizados mediante marcos metodológicos que integran diferentes niveles de desagregación.

En la mayoría de los trabajos se observa el interés por aplicar al menos un indicador relacionado con la producción o provisión de alimentos, fibras o combustibles. Aun así, los indicadores se refieren en esencia a aspectos ambientales de los agroecosistemas. En los párrafos siguientes se explican más detalles para cada grupo de investigaciones.

Características principales de la categoría EMDA

Los estudios de este grupo se realizaron, principalmente, en grandes superficies, emplearon análisis espacial o simulación, requiriendo fuentes secundarias de información para efectuar la evaluación de la MF.

También se destaca el uso de métodos mixtos con la participación de expertos o tomando en cuenta la opinión de diferentes actores relacionados con los sistemas sometidos a evaluación, como productores y funcionarios públicos. En particular, se observa que se están incorporando los métodos de análisis multicriterio (MAMC), en donde el proceso jerárquico analítico es el más aplicado.

Los estudios del grupo EMDA proporcionan una visión integral de la MF de áreas amplias, aprovechando herramientas e información existentes que se actualizan constantemente. Sin embargo, los propios autores de estas investigaciones señalan varias limitaciones que deberán abordarse en futuros trabajos. Entre estas se encuentran la disponibilidad y calidad de los datos utilizados, lo cual puede afectar la precisión y representatividad de los resultados obtenidos (Li et al., 2022; Tran et al., 2022; Lin and Yun, 2023). También se destaca la escasez de datos empíricos, lo que en algunos casos podría introducir subjetividad y limitar la precisión de los resultados (Tran et al., 2022). Además, se reconoce que la selección de funciones o paquetes de servicios ecosistémicos depende de los investigadores o de la información disponible, lo que puede tener un carácter subjetivo (Stürck and Verburg, 2017; Ren, 2021).

Características principales de la categoría EMFA

La información utilizada proviene principalmente de mediciones en campo, encuestas, entrevistas y, en menor medida, de datos secundarios. Las investigaciones de este grupo suelen incluir indicadores más especializados que los del grupo EMDA, ya que abordan temas específicos como el suelo, la biodiversidad o estudios de laboratorio detallados. Generalmente, son estudios que se han realizado a nivel de muestras de suelo, en fincas y en algunos casos en grandes superficies, pero enfocados en algún elemento o componente del sistema. También se observa la incorporación, principalmente, del proceso analítico jerárquico, cuando se utilizan los MAMC.

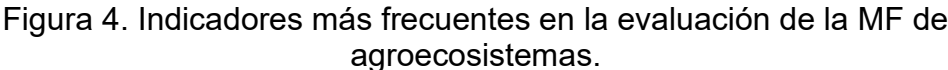
En el grupo EMFA, se menciona que los resultados de las evaluaciones dependen de las prácticas agrícolas aplicadas a través del tiempo (Rodríguez Sousa et al., 2020; Yang et al., 2023), en ese sentido existe la limitante de la falta de seguimiento o mecanismos de monitoreo del sistema agrícola de interés, para mayor comprensión de dichos resultados. De manera similar que en el grupo EMDA, el peso que se otorga a los indicadores puede presentar cierta subjetividad (Marques-Perez and Segura, 2018; Rodríguez Sousa et al., 2020),

por lo tanto, es necesario experimentar con diferentes metodologías en la búsqueda de las más robustas, para este tema complejo.

Características generales de los indicadores utilizados en la evaluación de la MF

Aunque la mayoría de las investigaciones trata de analizar diferentes dimensiones, aún prevalecen los indicadores de tipo ambiental en términos de cantidad. La figura 1 muestra las variables o indicadores que se emplean con más frecuencia en las evaluaciones que se han realizado. Esta tendencia coincide con los señalamientos de algunos investigadores, quienes remarcan el desequilibrio en el tipo de indicadores en las evaluaciones relacionadas con la MF o sostenibilidad (Nowack et al., 2022; Lin and Yun, 2023).

Los indicadores más comunes están relacionados con la fertilidad del suelo y la producción, tal como se evidencia en las palabras de mayor tamaño en la Figura 4. Aunque se han utilizado indicadores de tipo socioeconómico, se observa una clara predominancia de aquellos de temas ambientales. Por lo tanto, es necesario mejorar el balance entre los diferentes tipos de indicadores o prestar atención en sus ponderaciones con el fin de lograr una evaluación más exhaustiva y equilibrada, considerando las interacciones positivas y negativas que ocurren en los sistemas.



Cuadro 4. Variables e indicadores utilizados en la evaluación de la MF de agroecosistemas.

54

Crossman y Bryan, 2009*	Ingreso agrícola anual promedio; Rentabilidad económica neta; Índice de Diversidad de Shannon; Beneficios para especies y ecosistemas; Beneficio total para el suelo; Beneficios para el agua; Total de equivalentes de CO₂ secuestrados/año. <i>Superficie del área de estudio: 11.87 millones de ha.</i> Densidad de cabezas de ganado; Producción agrícola; Madera en plantaciones forestales; Escorrentía, suministro de agua renovable; Carbono almacenado en suelo y biomasa; Carbono orgánico en el suelo; Evapotranspiración; Capacidad de almacenamiento de agua del suelo; Agua del suelo en capacidad de filtración; Cobertura de bosque ribereño en río; Cobertura de bosque natural; Zonas sin erosión; Densidad del turismo rural establecimientos; Zona de especial protección; Hábitat de interés comunitario. <i>Superficie del área de estudio: 720,000 ha.</i>
Rodríguez-Loinaz et al., 2015*	Producción de cultivos; Materia prima; Regulación del clima; Regulación de inundaciones; Polinización; Control de la erosión; Turismo de naturaleza; Comida salvaje; Función residencial; Conectividad del hábitat; Agro-biodiversidad; Hábitat de megafauna. <i>Área de estudio: Unión Europea.</i> Ingreso; Estabilidad de los ingresos en el tiempo; Autonomía frente a subsidios institucionales; Independencia de los insumos externos a los agrícolas; Oportunidades comerciales y de venta; Productividad; Cosecha con crecientes perspectivas de éxito; Calidad del aceite de oliva; Condiciones de salud del trabajo de los agricultores; Empleo local directo; Empleo local indirecto; Justicia social en las zonas rurales; Presencia de la agricultura en regiones desfavorecidas; Compatibilidad con los valores socioculturales locales; Uso recreacional; Menos erosión del suelo; Fertilidad del suelo; Uso racional del agua de riego; Menos contaminación del agua; Menos contaminación atmosférica; Biodiversidad. <i>Área de estudio: 4.04 millones de ha.</i>
Stürck & Verburg, 2017*	Unidades agrícolas en propiedad; Motivo de propiedad; Tiempo de trabajo del cónyuge en la finca; Nuevo edificio de granja; Nuevos drenajes; Irrigación en finca; Área de cultivo del área total; Planes para áreas reservadas; Terreno alquilado; Número de ganado; Cambio, pasto a rotación; Cambio, sin cultivar a la rotación; Formulario de propiedad; Número de residentes de la granja; Motivo de propiedad; Nuevos edificios de granja residencial; Edificios de producción cambiados a residenciales; Tierra alquilada; Mejoras en jardines privados; Área de pasto; Área forestal; Área no cultivada; Planes para cambios de retirada de tierras; Edad de las áreas naturales; Estado de la agricultura ecológica; Número aumentado de la vida silvestre observada; Cambio, rotación a pasto; Cambio, rotación a baldío; Setos plantados; Diques establecidos; Pequeñas áreas naturales establecidas; Nuevos estanques o lagos; Bordes de ríos sin cultivar; Subvenciones para la reducción de nitratos;
Parra-López et al., 2008*	
Andersen et al., 2013*	

	Subvenciones para pastos permanentes; Subvenciones para proyectos de naturaleza; Actividades de caza; Interés por la vida silvestre (no la caza); Mejora del terreno de caza; Actividades de pesca; Actividades de equitación; Nuevo bosque plantado; Mejoras de accesibilidad (establecimiento de caminos y senderos); La recreación de otras personas; Valor de amenidad expresado; Actividades recreativas de la familia campesina. <i>Área de estudio: 11,300 ha.</i> Riqueza de especies de carábidos; Riqueza de morfo-grupos de insectos visitantes de flores; Riqueza de malezas; Abundancia de carábidos; Abundancia de arañas; Abundancia de estafilínidos; Abundancia de larvas de mariquitas; Abundancia de sírfidos; Abundancia de áfidos; Abundancia de malezas problemáticas; Abundancia de insectos que visitan flores de malezas; Rendimiento del cultivo; Margen semineto; Horas de trabajo. <i>Área de estudio: parcelas de cereales, sin especificar la superficie.</i>
Alignier et al., 2024**	Acumulación de biomasa; Rendimiento de los cultivos comerciales; Rentabilidad del sistema; Eficiencia de barbecho; Nematodos de vida libre; Nematodo parásito; Respiración acumulada del suelo; Carbón activo; Supresión de biomasa de malezas; Nitrógeno en la biomasa del cultivo de cobertura; Fijación biológica de Nitrógeno; Acumulación de Nitrógeno en barbecho; Agregados mega y macro, 0-10 cm; Agregados mega y macro, 10-30 cm. <i>Área de estudio: parcelas experimentales de 40 m².</i>
Garba et al., 2024**	β-glucosidasa; Celobiosidasa; Sacarasa; N -acetil-glucosaminidasa; Ureasa; Fosfatasa; Catalasa; Deshidrogenasa; Leucina-aminopeptidasa. <i>Área de estudio: parcelas de arroz y maíz, sin especificar la superficie.</i>
Zhou et al., 2024**	Producción de arroz, algodón y cultivos oleaginosos; Producción de productos de agua dulce; Volumen de rendimiento de agua; Volumen de escorrentía; Índice de calidad del hábitat; Exportación total de nitrógeno; Exportación total de fósforo; Capacidad de almacenamiento de carbono; Materia orgánica del suelo; Valor de pH; Índice de potencial de recreación. <i>Área de estudio: 1,154,750 ha.</i>
Lin & Yun, 2023**	pH del suelo; Carbono de biomasa microbiana; Nitrógeno de biomasa microbiana; Contenido de agua del suelo; Carbono orgánico del suelo; Temperatura del suelo; Nitrógeno total del suelo; Fósforo total; Potasio total; Nitrógeno disponible; Fósforo disponible (Olsen-P); Potasio disponible; Enzima de adquisición de carbono; Enzima de adquisición de nitrógeno; Enzima de adquisición de fósforo; β-glucosidasa; Celobiosidasa; β-1,4-N-acetilglucosaminidasa; Fosfatasa alcalina; Leucina aminopeptidasa. <i>Área de estudio: parcelas experimentales de 19.25 m², 16.5 m², 20 m² y 30 m².</i>
Yang et al., 2023**	

Zhang et al., 2023**	Rendimiento del cultivo; Participación per cápita en el rendimiento de cereales; Proporción de tierra cultivada; Índice de cultivos múltiples; Valor añadido agrícola per cápita; Productividad laboral para la producción de granos; Nivel de mecanización agrícola; Provisión de empleo; Superficie de tierras agrícolas per cápita; Ingreso neto per cápita; Intensidad de aplicación de fertilizante químico; Capacidad de suministro de agua; Valor del servicio ecosistémico; Dominio ecológico de las tierras cultivadas; Índice de biodiversidad. <i>Área de estudio: región comprendida por cinco provincias (Jiangsu, Anhui, Shandong, Henan y Hebei) y dos municipalidades (Beijing y Tianjin) de China.</i>
----------------------	---

Muestra de los *artículos más citados y los **artículos más recientes.

En términos generales, se observa que, en la muestra presentada, los estudios que profundizan en las funciones del sistema han utilizado análisis muy especializados sobre elementos de los agroecosistemas, de acuerdo con la presente revisión. El Cuadro 4 también ilustra que las escalas son variables, desde experimentos en parcelas hasta nivel de país.

La diversidad de elementos considerados entre las investigaciones dificulta realizar comparaciones de los resultados. Un aspecto para mejorar la evaluación de la MF es la justificación de los indicadores o variables seleccionadas. Garland et al. (2021) enfatizan esta necesidad en su trabajo. En esa misma línea, Stokes et al. (2023) recomienda caracterizar la magnitud, estabilidad y vulnerabilidad de los indicadores de servicios ecosistémicos valorados.

Desde una perspectiva general, la evaluación de los agroecosistemas se caracteriza por la aplicación de metodologías mixtas (análisis espacial, modelación, cuestionarios, entrevistas, mediciones de campo y experimentos), mediante indicadores, principalmente, de tipo ambiental. Las escalas en su mayoría corresponden a varias unidades de producción en conjunto o superficies tan extensas como un país que requieren información de fuentes secundarias.

4.5.3. Consideraciones en la evaluación de la MF de agroecosistemas

Además de los conceptos mencionados en los apartados anteriores, el mismo término “evaluación” requiere de una explicación más detallada. Al respecto, Andrich and Marais (2019) mencionan que los términos “propiedad”, “rasgo”, “construcción”, “atributo” y “variable” se pueden utilizar en diferentes áreas del conocimiento como sinónimos. Trasladando el análisis al presente manuscrito, la MF es una propiedad, rasgo o algún otro sinónimo de los agroecosistemas. Esto implica que no se mide directamente, sino que se mide su manifestación. Los autores referidos argumentan que antes de que se pueda medir un rasgo es necesario contar con un procedimiento controlado para manifestar la propiedad, a este procedimiento se le denomina evaluación. A esta la definen como “un conjunto de observaciones que surgen cuando las manifestaciones de alguna propiedad se observan de alguna manera sistemática aceptable para la investigación o el área de especialización”.

Por otro lado, es necesario enfatizar que el término “multifuncional” se utiliza para cualquier ámbito relacionado con el ser humano. En su acepción más común, es un calificativo para cualquier sistema que ofrece más de una función o servicio. Tal interpretación es utilizada en algunas investigaciones que abordan el carácter multifuncional de la agricultura. Al respecto, en los siguientes párrafos se resaltan algunos argumentos que pueden explicar las diferentes formas de analizar la MF, según los resultados de esta investigación.

El primer argumento se refiere a la inexistencia de actividades productivas unifuncionales, dicho de otra forma, en mayor o menor medida las acciones realizadas para lograr un objetivo en un sistema presentan más de un efecto positivo o negativo dentro o al exterior de este. Sin embargo, los estudios que analizan la MF agrícola, en general, incluyen indicadores para evaluarla desde el lado favorable, así lo describe Andersen et al. (2013), quienes discuten la visión positivista de la agricultura. En este sentido, la postura que se defiende en ese manuscrito es que la MF agrícola deseable, en un análisis objetivo, es aquella que maximice los efectos positivos y minimice los negativos.

Otra situación sobre la diversidad de perspectivas es que la interpretación de MF bajo la cual se realizaron las evaluaciones generalmente no está explícita. Esto dificulta la comparación de los resultados de las investigaciones. De ahí, secundar la sugerencia de algunos autores sobre la necesidad de explicar el uso de uno u otro indicador.

Las condiciones antes descritas explican el motivo de los diferentes enfoques y alcances bajo los cuales se han realizado las evaluaciones de MF de agroecosistemas. Algunos aplican de manera más fiel la definición de evaluación explicada en el primer párrafo de este apartado. De forma que realizan el análisis de un marco metodológico sobre la MF, es decir, generan un procedimiento controlado para evaluar la manifestación de la propiedad y luego cuantifican la MF, esto significa que avanzan más allá de la evaluación. En otro enfoque se combinan ambas estrategias; sin embargo, se observa que, en la mayoría de los casos, no se distingue claramente entre la evaluación y la cuantificación, ya que se presentan como conceptos sinónimos.

Asimismo, el nivel de profundidad de los estudios en términos de escala y enfoque de variables confirman la diversidad de interpretaciones de MF en relación con agroecosistemas. Así se encuentran investigaciones, en referencia a la escala, que analizan la MF asociada con agroecosistemas en superficies extensas hasta las que utilizan muestras en laboratorio. Con respecto al enfoque, se han aplicado aquellas que evalúan indicadores en diferentes dimensiones hasta las que se especializan en variables de la salud del suelo o las relacionadas con biodiversidad.

4.5.4. Limitaciones del estudio y futuras investigaciones

Si bien en esta revisión se realizó un análisis general de los indicadores empleados, se considera necesario que futuras investigaciones profundicen en el tipo de indicador utilizado según cada perspectiva —ya sea por escalas de análisis, tipos de dimensiones, funciones o servicios ecosistémicos, o métodos

de evaluación— con el fin de caracterizar de manera más precisa las evaluaciones existentes.

Por la sistematización que ofrecen los repositorios utilizados, esta revisión se enfocó en literatura registrada en las bases de datos Scopus y Web of Science; sin embargo, se reconoce la conveniencia de incorporar en trabajos futuros artículos científicos no indexados en estas plataformas, lo cual permitiría ampliar el panorama de análisis.

La evaluación multidimensional de agroecosistemas aún se encuentra difusa entre la evaluación de la MF agrícola en grandes escalas, MF de usos de la tierra, MF rural y MF del paisaje agrícola. Explorar este campo con mayor profundidad resulta especialmente pertinente, dado que en la actualidad se sugiere su aplicación como herramienta para el diseño e implementación de políticas públicas relacionadas con la agricultura sostenible.

4.6. Conclusiones

Las investigaciones revisadas utilizan e interpretan la MF de forma diversa, influida por la escala, el objeto de estudio y el enfoque conceptual, principalmente. En la revisión realizada se identificaron dos enfoques principales: la EMDA que se aplica a superficies con usos múltiples del suelo, y la EMFA, enfocada en sistemas agrícolas más específicos. Si bien hay una tendencia creciente a perspectivas más integrales, prevalece la falta de una definición explícita de MF y se omiten los efectos negativos que pudieran presentarse. Este panorama pone de relieve la necesidad de precisar conceptualmente la MF y delimitar claramente el tipo de evaluación empleada, en función del objeto de estudio, así como de incorporar de forma sistemática tanto los aportes positivos como las externalidades negativas de la actividad agropecuaria en futuras investigaciones.

Las evaluaciones de MF en agroecosistemas muestran gran heterogeneidad metodológica. Las EMDA emplean análisis espaciales y fuentes secundarias, mientras que las EMFA se basan en datos de campo y análisis especializados.

Predominan los indicadores ambientales, especialmente sobre suelo y productividad en términos de frecuencia. Además, hay variabilidad en el número de indicadores utilizados y poca justificación en su selección. Estas limitaciones reducen la comparabilidad entre estudios. Para avanzar, se requieren marcos metodológicos más equilibrados, justificados y transparentes que integren múltiples dimensiones y distingan claramente entre evaluación y cuantificación, fortaleciendo así la solidez de futuras evaluaciones en agroecosistemas. Estos avances en los procesos de evaluación pueden contribuir a decisiones técnicas, científicas y de política pública más informadas y coherentes, que promuevan una agricultura más sostenible.

4.7. Literatura citada

ALIGNIER, Audrey, CAROF, Matthieu, AVIRON, Stéphanie, «Assessing cropping system multifunctionality: An analysis of trade-offs and synergies in French cereal fields», *Agricultural Systems*, vol. 221, 104100, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104100>

ANDERSEN, Peter Stubkjær, VEJRE, Henrik, DALGAARD Tommy, BRANDT, Jesper, «An indicator-based method for quantifying farm multifunctionality», *Ecological Indicators*, vol. 25, (2013), pp. 166–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.025>

ANDRICH, David, MARAIS, Ida, «A course in rasch measurement theory: measuring in the educational, social and health sciences», 1ra. Edición, Springer Nature Singapore, 2019, pp. 3–11. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7496-8_1

CASANOVA, Lorena, MARTÍNEZ, Juan, LÓPEZ, Silvia, LÓPEZ, Gustavo, «De von Bertalanffy a Luhmann: Deconstrucción del concepto “agroecosistema” a través de las generaciones sistémicas», *Revista Mad*, no. 35, (2016), pp. 60-74. <https://doi.org/10.5354/0718-0527.2016.42797>

CROSSMAN, Neville D., BRYAN, Brett A., «Identifying cost-effective hotspots for restoring natural capital and enhancing landscape multifunctionality», *Ecological Economics*, vol. 68, no. 3, (2009), pp. 654–68. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.003>

DE GROOT, Rudolf S., «Environmental functions as a unifying concept for ecology and economics», *Environmentalist*, vol. 7, no. 2, (1987), pp. 105–09. <https://doi.org/10.1007/BF02240292>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), «El estado mundial de la agricultura y la alimentación 2022. Aprovechar la automatización de la agricultura para transformar los sistemas agroalimentarios», 2022, pp. 200. <https://doi.org/10.4060/cb9479es>

GALLARDO-LÓPEZ, Felipe, LINARES-GABRIEL, Ariadna, HERNÁNDEZ-CHONTAL, Mario-Alejandro, «Theoretical and conceptual considerations for analyzing social interfaces in agroecosystems», *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, 658438, (2021). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.658438>

GARBA, Ismail I., BELL, Lindsay W., CHAUHAN, Bhagirath S., WILLIAMS, Alwyn, «Optimizing ecosystem function multifunctionality with cover crops for improved agronomic and environmental outcomes in dryland cropping systems», *Agricultural Systems*, vol. 214, 103821, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103821>

GARLAND, Gina, BANERJEE, Samiran, EDLINGER, Anna, MIRANDA OLIVEIRA, Emily, HERZOG, Chantal, WITTEWER, Raphaël, PHILIPPOT, Laurent, MAESTRE, Fernando T., VAN DER HEIJDEN, Marcel G.A., «A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A Review», *Journal of Ecology*, vol. 109, (2021), pp. 600–13. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13511>

HÖLTING, Lisanne., JACOBS, Sander, FELIPE-LUCIA, María R., MAES, Joachim, NORSTRÖM, Albert V., PLIENINGER, Tobias, CORD, Anna F., «Measuring ecosystem multifunctionality across scales», *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 12, (2019). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab5ccb>

HUANG, Jiao, TICHIT, Muriel, POULOT, Monique., DARLY, Ségolène, LI, Shuangcheng, PETIT, Caroline, AUBRY, Christine, «Comparative review of multifunctionality and ecosystem services in sustainable agriculture», *Journal of Environmental Management*, vol. 149, (2015), pp. 138–47. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2014.10.020>

LI, Jingxin, ZHANG, Hongqi, XU, Erqi, «Quantifying production-living-ecology functions with spatial detail using big data fusion and mining approaches: A case study of a typical Karst region in Southwest China», *Ecological Indicators*, vol. 142, 109210, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109210>

LIN, Haowen, YUN, Hong, «Spatiotemporal dynamics of ecosystem services driven by human modification over the past seven decades: a case study of Sihua agricultural Watershed, China», *Land*, vol. 12, 577, (2023). <https://doi.org/10.3390/land12030577>

LIU, Qinghua, SUN, Xiao, WU, Wenbin, LIU, Zhenhuan, FANG, Guangji, YANG, Peng, «Agroecosystem services: A review of concepts, indicators, assessment methods and future research perspectives», *Ecological Indicators*, vol. 142, 109218, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109218>

MANNING, Peter, VAN DER PLAS, Fons, SOLIVERES, Santiago, ALLAN, Eric, MAESTRE, Fernando T., MACE, Georgina, WHITTINGHAM, Mark J., FISCHER, Markus, «Redefining ecosystem multifunctionality», *Nature Ecology & Evolution*, vol. 2, no. 3, (2018), pp. 427–36. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0461-7>

MARQUES-PEREZ, Inmaculada, SEGURA, Baldomero, «Integrating social preferences analysis for multifunctional peri-urban farming in planning. an application by multi-criteria analysis techniques and stakeholders», *Agroecology*

and Sustainable Food Systems, vol. 42, no. 9, (2018), pp. 1029–57.
<https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1468379>

MELGAREJO, Vladimir, BAUTISTA-RODRÍGUEZ, Sandra Cecilia, CAMARGO PARDO, Mauricio, «Dimensiones y enfoques de valoración de los servicios ecosistémicos en agroecosistemas», Cuadernos de desarrollo rural, vol. 18, (2021). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cdr18.devs>

MOON, Wanki, «Conceptualising multifunctional agriculture from a global perspective: implications for governing agricultural trade in the post-Doha Round era», Land Use Policy, vol. 49, (2015), pp. 252–63.
<https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2015.07.026>

Millennium Ecosystem Assessment (MEA), «Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry», World Resources Institute, Washington, DC., 2005.

MURPHY, Maureen, CAREY, Rachel, ALEXANDRA, Leila, «Building the resilience of agri-food systems to compounding shocks and stresses: A case study from Melbourne, Australia», Frontiers in Sustainable Food Systems, vol. 7, (2023). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1130978>

NICHOLLS, Clara I., ALTIERI, Miguel A., VÁZQUEZ, Luis L., «Agroecología: principios para la conversión y el rediseño de sistemas agrícolas», Agroecología, vol. 10, no. 1, (2015), pp. 61-72.

NOWACK, Wiebke, SCHMID, Julia C., GRETHE, Harald, «Social dimensions of multifunctional agriculture in Europe - towards an interdisciplinary framework», International Journal of Agricultural Sustainability, vol. 20, no. 5, (2022), pp. 758–73. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1977520>

OSTANDIE, Noémie, GIFFARD, Brice, TOLLE, Pauline, UGAGLIA, Adeline Alonso, THIÉRY, Denis, RUSCH, Adrien, «Organic viticulture leads to lower trade-offs between agroecosystem goods but does not improve overall multifunctionality», Agricultural Systems, vol. 203, 103489, (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103489>

PARRA-LÓPEZ, Carlos, CALATRAVA-REQUENA, Javier, DE-HARO-GIMÉNEZ, Tomás, «A systemic comparative assessment of the multifunctional performance of alternative olive systems in Spain within an ahp-extended framework», Ecological Economics, vol. 64, no. 4, (2008), pp. 820–34.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.05.004>

REN, Kai, «Following rural functions to classify rural sites: an application in Jixi, Anhui province, China», Land, vol. 10, 418, (2021).
<https://doi.org/10.3390/land10040418>

RODRÍGUEZ SOUSA, Antonio Alberto, PARRA-LÓPEZ, C., SAYADI-GMADA, S., BARANDICA, J.M., RESCIA, A.J., «A multifunctional assessment of integrated and ecological farming in olive agroecosystems in southwestern Spain using the analytic hierarchy process», Ecological Economics, vol. 173, 106658, (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106658>

RODRÍGUEZ-LOINAZ, Gloria, ALDAY, Josu G., ONAINDIA, Miren, «Multiple ecosystem services landscape index: a tool for multifunctional landscapes conservation», *Journal of Environmental Management*, vol. 147, (2015), pp. 152–63. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.001>

SEIFERT, Stefan, WOLFF, Saskia, HÜTTEL, Silke, «Eco-efficiency in the agricultural landscape of North Rhine-Westphalia, Germany», *Agricultural Systems*, vol. 220, 104062, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104062>

STOKES, Alexia, BOCQUÉHO, Géraldine, CARRERE, Pascal, CONDE SALAZAR, Raphaël, DECONCHAT, Marc, GARCIA, Léo, GARDARIN, Antoine, GARY, Christian, GAUCHEREL, Cédric, GUEYE, Mamadou, HEDDE, Mickael, LESCOURRET, Françoise, MAO, Zhun, QUÉROU, Nicolas, RUDI, Gabrielle, SALLES, Jean-Michel, SOUBEYRAN, Raphael, SUBERVIE, Julie, VIALATTE, Aude, VINATIER, Fabrice, THOMAS, Marielle, «Services provided by multifunctional agroecosystems: questions, obstacles and solutions», *Ecological Engineering*, vol. 191, 106949, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106949>

STÜRCK, Julia, VERBURG, Peter H., «Multifunctionality at what scale? a landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change», *Landscape Ecology*, vol. 32, (2017), pp. 481–500. <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0459-6>

TRAN, Duy X., PEARSON, Diane, PALMER, Alan, GRAY, David, LOWRY, John, DOMINATI, Estelle J., «A comprehensive spatially-explicit analysis of agricultural landscape multifunctionality using a New Zealand hill country farm case study», *Agricultural Systems*, vol. 203, 103494, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103494>

WILLEMEN, Louise, HEIN, Lars, VAN MENSVOORT, Martin E.F., VERBURG, Peter H., «Space for people, plants, and livestock? quantifying interactions among multiple landscape functions in a Dutch rural region», *Ecological Indicators*, vol. 10, no. 1, (2010), pp. 62–73. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2009.02.015>

WITTEWER, Raphaël A., BENDER, Franz S., HARTMAN, Kyle, HYDBOM, Sofia, LIMA, Ruy A. A., LOAIZA, Viviana, NEMECEK, Thomas, OEHL, Fritz, OLSSON, Pål Axel, PETCHEY, Owen, PRECHSL, Ulrich E., SCHLAEPPPI, Klaus, SCHOLTEN, Thomas, SEITZ, Steffen, SIX, Johan, VAN DER HEIJDEN, Marcel G. A., «Organic and conservation agriculture promote ecosystem multifunctionality», *Science Advances*, vol. 7, (2021). <https://www.science.org>

XUE, Mengqi, WANG, Hongwei, WEI, Yiming, MA, Chen, YIN, Yucong, «Spatial characteristics of land use multifunctionality and their trade-off/synergy in Urumqi, China: implication for land space zoning management», *Sustainability*, vol. 14, 9285, (2022). <https://doi.org/10.3390/su14159285>

YANG, Ruizhe, YANG, Ze, YANG, Shilong, CHEN, Lan-lan, XIN, Jia, XU, Lingying, ZHANG, Xuechen, ZHAI, Bingnian, WANG, Zhaohui, ZHENG, Wei, LI, Ziyang, «Nitrogen inhibitors improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial nitrogen limitation», *Science of the Total*

Environment, vol. 880, 163238, (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163238>

ZHANG, Yingnan, LONG, Hualou, CHEN, Shuocun, MA Li, GAN Muye, «The development of multifunctional agriculture in farming regions of China: convergence or divergence?», Land Use Policy, vol. 127, (2023).

ZHOU, Tairan, LV, Quilin, ZHANG, Luxin, FAN, Jingbiao, WANG, Tianhao, MENG, Yunshan, XIA, Haiyang, REN, Xueqin, HU, Shuwen, «Converted paddy to upland in saline-sodic land could improve soil ecosystem multifunctionality by enhancing soil quality and alleviating microbial metabolism limitation», Science of the Total Environment, vol. 924, 171707, (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171707>

CAPÍTULO 5. SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES: TEMÁTICAS Y RESULTADOS DE SUS PRINCIPALES OBJETIVOS DE DISEÑO⁵

5.1. Resumen

Bajo el paradigma de la agricultura multifuncional, el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) destaca por su amplia trayectoria como tecnología agroforestal en México. Considerando los resultados positivos documentados en diversas investigaciones, resulta pertinente analizar los avances en el conocimiento generado sobre su desempeño. En este contexto, el objetivo de este manuscrito es analizar la investigación realizada sobre el sistema MIAF mediante la revisión de las temáticas abordadas en publicaciones científicas, para la comprensión de su desempeño como tecnología agroforestal en función de sus propósitos de diseño. La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos de acceso libre, así como en redes sociales académicas. La información de los artículos científicos fue organizada y sistematizada en Excel. Se analizaron 53 artículos científicos, publicados en el periodo 2006-2025. Como resultado del análisis, se observa que la producción científica se ha intensificado en años recientes; como reflejo de lo anterior, el 77% de los artículos fueron publicados después de 2019. Las principales temáticas de investigación identificadas fueron “Rendimiento, calidad y eficiencia en la producción”, “Formación del capital social y humano” y “Características físicas, químicas o biológicas del suelo. El sistema MIAF ha sido abordado desde múltiples disciplinas y escalas, lo cual refleja su complejidad y riqueza como objeto de estudio. No obstante, también se identifica la necesidad de metodologías integradas para evaluar su desempeño en los respectivos indicadores para este tipo de evaluaciones.

⁵ Sometido: Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente.
Estatus: enviado.

5.2. Abstract

Within the paradigm of multifunctional agriculture, the Intercropped Maize with Fruit Trees system (Milpa Intercalada con Árboles Frutales, MIAF) stands out for its long-standing trajectory as an agroforestry technology in Mexico. Given the positive outcomes documented across numerous studies, it is timely to examine the state of knowledge regarding its performance. Accordingly, this manuscript aims to analyse the body of research on MIAF by reviewing the themes addressed in scientific publications, thereby assessing its performance relative to its original design goals. Information was retrieved from open-access databases and academic social networks, then organized and systematized in Excel. In total, 53 scientific articles published between 2006 and 2025 were analyzed. As a result of the analysis, it was observed that scientific production has intensified in recent years; reflecting this, 77% of the articles were published after 2019. The dominant research themes identified were “Yield, quality and production efficiency,” “Human and social capital formation,” and “Physical, chemical and biological soil properties.” MIAF has been studied from multiple disciplinary perspectives and at varied scales, reflecting its complexity and richness as a research object. Nevertheless, the need for integrated methodologies to evaluate their performance and the respective indicators for this type of evaluation is also identified.

5.3. Introducción

La agricultura multifuncional ha cobrado creciente interés en las últimas décadas como paradigma que integra aspectos de diferentes dimensiones en sistemas de producción. Dentro de este enfoque, los Sistemas Agroforestales (SAF) han sido reconocidos por su potencial para diversificar la producción, mejorar la resiliencia socioecológica y proporcionar servicios ecosistémicos clave (Nair et al., 2021; Lalani et al., 2021). Uno de los desarrollos más representativos en este ámbito en México es el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF), resultado de más de treinta años de investigación aplicada colaborativa entre el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias y el Colegio de

Postgraduados (Turrent Fernández et al., 2017), así como las aportaciones particulares de otras instituciones mexicanas (Tapia-Hernández et al., 2024).

El MIAF surge como una alternativa tecnológica diseñada para intensificar la milpa tradicional mediante la incorporación deliberada de árboles frutales (en variantes de la tecnología, retención de especies perennes de interés), especialmente en zonas de ladera y contextos de alta vulnerabilidad social y ambiental. Su desarrollo se fundamenta en conocimientos tanto científicos como tradicionales, y ha evolucionado desde ensayos experimentales hasta su integración en políticas públicas como el Programa Sembrando Vida. Esta tecnología persigue explícitamente cuatro propósitos fundamentales: (1) incrementar el ingreso neto y el empleo familiar, (2) proteger el suelo contra la erosión, (3) fomentar la interacción entre cultivos para optimizar el uso de recursos naturales e insumos, y (4) contribuir a la captura de carbono atmosférico (Turrent Fernández et al., 2017).

A lo largo de su evolución, la investigación científica sobre el MIAF ha abordado diversas dimensiones de su desempeño. Estas incluyen estudios sobre rendimientos productivos, eficiencia del uso de la tierra, calidad de frutos, rentabilidad económica, dinámica del carbono, conservación del suelo, biodiversidad edáfica, organización comunitaria y género, entre otros. Esta diversidad temática refleja la naturaleza multifuncional del sistema y evidencia un interés creciente por comprender sus efectos más allá de la productividad.

Pese a los avances, los estudios sobre el MIAF se encuentran dispersos en términos de enfoques, escalas y criterios de evaluación, lo que dificulta una visión integral de su desempeño. En este contexto, se vuelve relevante analizar la trayectoria de la investigación científica relacionada con el MIAF, diferenciando las temáticas abordadas y evaluando su grado de correspondencia con los propósitos para los cuales fue concebido.

El objetivo de este artículo es analizar la investigación realizada sobre el sistema MIAF mediante la revisión de las temáticas abordadas en publicaciones

científicas, para la comprensión de su desempeño como tecnología agroforestal en función de sus propósitos de diseño. Esta aproximación permite identificar tanto los avances como los vacíos de conocimiento, así como orientar futuras investigaciones hacia una evaluación más holística y contextualizada del sistema.

5.4. Materiales y métodos

La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos de acceso libre como Redalyc y Scielo, así como en las redes sociales ResearchGate y Academia.edu, además del motor de búsqueda Google Scholar. Las palabras clave utilizadas para este propósito fueron “MIAF” y “Milpa Intercalada con Árboles Frutales”. La información de los artículos científicos fue organizada y sistematizada en Mendeley y Excel, desde la primera publicación hasta la más reciente según los criterios de búsqueda aplicados.

A partir de la lectura de los artículos, con especial atención en los objetivos explícitos que guiaron cada investigación, se clasificaron en las diferentes temáticas abordadas hasta el momento. Cabe resaltar que algunos trabajos participaron en más de una temática por ese motivo se mencionan en varios apartados. Los artículos de revisión o ensayos no fueron incluidos en el análisis, pero enriquecieron la discusión de este manuscrito.

Posteriormente, se describieron cada una de las temáticas. Esta información permitió el análisis de los avances en la investigación con los propósitos establecidos para el sistema MIAF.

5.5. Resultados y discusión

Los artículos científicos analizados fueron 53, publicados entre 2006 y febrero de 2025. Las revistas “Terra Latinoamericana”, “Agrociencia”, “Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas”, “Agricultura, Sociedad y Desarrollo”, “Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional”, “Agricultura Técnica en México”, “Revista Fitotecnia Mexicana” y “Tropical and Subtropical Agroecosystems” concentraron el 60% de los trabajos revisados. La producción

científica se ha intensificado en años recientes, dado que el 77% de los artículos se publicaron entre 2020 y el último documento incluido para esta revisión de febrero de 2025.

5.5.1. Categorías temáticas de investigación sobre el sistema MIAF

Las investigaciones se clasificaron en ocho categorías temáticas. Las denominadas “Rendimiento, calidad y eficiencia en la producción”, “Formación del capital social y humano” y “Características físicas, químicas o biológicas del suelo”, fueron los tópicos que se abordan en el 75% de los artículos recopilados. En los siguientes subtítulos se presentan los principales resultados de cada una de las temáticas identificadas.

1. Rendimiento, calidad y eficiencia en la producción

El análisis del rendimiento, la calidad de los productos y la eficiencia en el uso de recursos es clave para valorar la viabilidad técnica del sistema MIAF. Esta categoría agrupa estudios que examinan la productividad de cultivos, la calidad de los frutos (especialmente durazno), la eficiencia relativa del uso de la tierra (ERT) y el efecto de arreglos topológicos, injertos, fertilización o prácticas de manejo sobre estos indicadores.

Uno de los principales temas en esta línea de investigación es que el sistema MIAF incrementa significativamente la eficiencia relativa del uso de la tierra. Torres Zambrano et al. (2008) y Albino-Garduño et al. (2015) reportaron valores de ERT superiores a uno ($ERT > 1$) al comparar el MIAF con monocultivos, tanto en frutales como en cultivos básicos, lo cual se atribuye a la complementariedad en el uso de luz, agua y nutrientes.

En esta misma línea, Tapia-Hernández et al. (2021) evaluaron la incorporación de seis especies vegetales anuales como sotocultivos en el sistema MIAF mazahua. Sus resultados indican que el tomate de cáscara, el nabo y el haba en arreglos de un surco de maíz en asociación con frijol de guía alternado con un surco de tomate de cáscara, nabo y haba, pueden intercalarse efectivamente con

maíz y frijol, mejorando la productividad con ERT de 1.1, 1.4 y 1.2, respectivamente.

Complementariamente, Hernández-Escobar et al. (2024) destacaron que, en su investigación que incluyó la labranza de conservación y la convencional, esta segunda en el arreglo 2x2, permitió mejorar el rendimiento de maíz y frijol con una ERT de 1.81.

Respecto al componente frutal, Santiago-Mejía et al. (2008, 2015, 2021) demostraron que el uso de árboles compuestos por cultivares de floración temprana y tardía puede retrasar el inicio de la floración y reducir los daños por heladas, lo que se traduce en un mejor cuajado y mayor calidad de los frutos. Asimismo, prácticas de fertilización equilibrada y la aplicación de polinaza mostraron efectos positivos en la concentración de sólidos solubles y reducción de la acidez; sin embargo, un exceso de nitrógeno podría comprometer la firmeza del fruto.

Por otro lado, Muñoz-Ruiz et al. (2024) evaluaron estrategias de intensificación en etapas tempranas del componente frutal del sistema MIAF. Encontraron que la calabaza nativa redujo el desarrollo del durazno por competencia radicular y menor humedad del suelo. En cambio, el bayocote no afectó negativamente al frutal, mostrando compatibilidad en esta fase inicial.

Finalmente, Ramírez-Maces et al. (2023) ampliaron la mirada hacia la diversidad de especies intercaladas en la milpa. Su investigación muestra que dicha diversidad varía según las condiciones climáticas, prácticas de manejo y estructura familiar, y que esta variabilidad contribuye no solo a la seguridad alimentaria, sino también a la resiliencia del sistema productivo.

2. Rentabilidad y potencial productivo

Por un lado, Luna Méndez et al. (2016) evaluaron la rentabilidad y competitividad del sistema MIAF con nuez de castilla (*Juglans regia*) en comparación con huertos tradicionales en la región de la Sierra Nevada de Puebla, utilizando el

enfoque del Análisis Matricial de Políticas (MAP). Sus resultados indican que, a precios de privados, el sistema MIAF es menos rentable y competitivo que los huertos. También se destaca que los mecanismos de comercialización de la región muestran una cadena funcional en la que resalta la tradición basada en confianza y respeto entre los involucrados; con una fuerte perspectiva de desarrollo dado el creciente mercado especializado.

Por su parte, el estudio de Cadena-Iñiguez et al. (2018), realizado en zonas marginadas de Chiapas, ofrece una perspectiva más optimista sobre la viabilidad del MIAF. A través de un diagnóstico empírico, concluyen que este sistema posee un alto potencial para la reconversión productiva en regiones de ladera con alta marginación. Aunque no se incluye un análisis profundo del mercado, se resalta una relación beneficio/costo promedio superior a 2, lo que sugiere una alternativa rentable y viable para el fortalecimiento de la economía rural.

3. Formación de capital humano y social

Esta categoría engloba los procesos de aprendizaje, organización, cooperación, autoorganización comunitaria y transferencia tecnológica que permiten a los productores mejorar sus capacidades técnicas, fortalecer sus redes sociales y desarrollar estrategias colectivas para afrontar los retos productivos, ambientales y económicos.

Para esta revisión, el capital humano se refiere al fortalecimiento de conocimientos, habilidades técnicas y capacidades de los productores (Becker, 1994; Leoni, 2025), mientras que el capital social abarca las relaciones de confianza, colaboración y acción colectiva en torno a prácticas productivas comunes (Ostrom & Ahn, 2003; Rahe et al., 2025). Ambos componentes son fundamentales para escalar la adopción del sistema MIAF y garantizar su permanencia en el tiempo, especialmente en regiones rurales con alta vulnerabilidad social o ambiental. Conviene señalar que tanto el capital humano como el social pueden abordarse con mayor profundidad y amplitud en futuras

investigaciones, considerando los enfoques más recientes sobre estos conceptos.

Diversos estudios coinciden en señalar que los métodos participativos, como las escuelas de campo o rurales junto con el enfoque andragógico de “aprender haciendo”, resultan particularmente eficaces para fomentar tanto el aprendizaje técnico como social entre pequeños productores, incluso en contextos de baja escolaridad. Estas estrategias no solo mejoran la comprensión de las tecnologías asociadas al MIAF, sino que también incrementan su adopción y adaptabilidad local, al tiempo que fortalecen el empoderamiento de los agricultores como agentes de innovación dentro de sus comunidades (López Gaytán et al., 2008; Martínez Gómez et al., 2021; Orozco Cirilo et al., 2009).

Además del fortalecimiento individual, varios estudios subrayan el papel de la organización y la acción colectiva como pilares del capital social. Investigaciones como las de Regalado-López et al. (2020, 2021), Pillado Albarrán et al. (2023) y Balcazar Quiñones et al. (2023) mostraron que estas formas organizativas facilitan el intercambio de conocimientos, la reducción de costos, el acceso a insumos y mercados, y la escalabilidad de la transferencia tecnológica. Estas dinámicas colectivas también permiten enfrentar desafíos estructurales como la comercialización, el financiamiento y la adaptación al cambio climático, fortaleciendo así la resiliencia socioecológica de los grupos de productores.

En este mismo sentido, se destaca el papel de las redes institucionales e interinstitucionales en la construcción de un entorno favorable para el desarrollo del MIAF. Zambada-Martínez et al. (2013) señalaron que la formación de alianzas entre actores clave del desarrollo rural contribuye a mejorar la coordinación y sinergia necesarias para promover la innovación tecnológica en zonas marginadas.

A pesar de estos avances, algunas investigaciones también advierten sobre barreras persistentes que limitan el fortalecimiento del capital humano y social. Ortiz-Jiménez et al. (2023) y Morales-Guerra et al. (2024) identificaron

debilidades como la falta de preparación metodológica de técnicos para abordar contextos sociolingüísticos diversos, así como la escasa generación de redes sociales efectivas desde los programas gubernamentales. En cuanto al desarrollo de investigaciones, Tapia-Hernández et al. (2021) resaltaron el diálogo de saberes y el uso de metodologías participativas para definir los sotocultivos pertinentes al contexto sociocultural y ambiental e involucrar de manera más activa en una relación horizontal a la familia campesina. Estos hallazgos evidencian la necesidad de adaptar las estrategias de formación y acompañamiento a las realidades culturales, lingüísticas y sociales específicas de los territorios rurales.

4. Aspectos bioculturales y género

La incorporación del sistema MIAF en comunidades rurales no sólo implica una innovación productiva, sino también transformaciones en los planos territorial, cultural y de género.

Juárez Paulín et al. (2018) analizaron cómo las mujeres participantes en un proyecto MIAF en Chiapas experimentan simultáneamente procesos de empoderamiento y subordinación. La investigación revela que, aunque su inclusión en el sistema MIAF abre espacios para cuestionar y redefinir los roles de género, las estructuras organizativas siguen reproduciendo desigualdades. El estudio subraya la necesidad de incorporar una perspectiva de género crítica en los programas.

Por su parte, Pillado-Albarrán et al. (2022) destacaron la adaptación biocultural del MIAF en comunidades mazahuas, donde el sistema se ajusta de manera sinérgica a las condiciones ecológicas y culturales locales. La implementación exitosa se fundamenta en la integración de conocimientos tradicionales de la milpa con saberes científicos, reforzando el patrimonio biocultural y promoviendo un modelo de producción contextualizado.

Finalmente, Ramírez-Maces et al. (2023) documentaron la diversidad de especies presentes en sistemas MIAF de localidades situadas en la Sierra Mixe de Oaxaca. En su estudio, identificaron 31 especies de flora, entre las cuales destacan diversas arvenses comestibles. Los autores destacan que dichos sistemas contribuyen a la conservación de especies con usos alimentarios, medicinales, culturales y religiosos.

5. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo

En este grupo temático se encuentran estudios como los de Vergara-Sánchez & Etchevers-Barra (2006), Arriaga-Vázquez et al. (2020), Torres Zambrano et al. (2021) y Duché-García et al. (2021) quiénes destacaron que el sistema MIAF puede mejorar indicadores clave de fertilidad como el pH (hacia la neutralidad), el contenido de materia orgánica, el fósforo disponible y el nitrógeno, especialmente en áreas receptoras de escorrentía. La combinación de árboles con cultivos anuales crea microambientes favorables a la acumulación de nutrientes.

Por su parte, González-Molina et al. (2008) realizaron un estudio sobre los factores que deben considerarse en la determinación de cambios del carbono orgánico del suelo (COS) de terrenos en laderas (incluyeron sistemas MIAF), cuyos resultados resaltan la necesidad de estandarizar la eliminación de los residuos orgánicos de la muestra en los análisis correspondientes, así como la determinación de la densidad aparente. González-Molina et al. (2016) también aportaron en temas metodológicos con la evaluación del modelo RothC en la simulación de cambios del COS. Acosta-Mireles et al. (2022) contribuyeron con los modelos cinéticos de n-orden para estimar las reservas y dinámica del carbono en el suelo. En relación con este tema, Zetina-Lezama et al. (2022) encontraron que los sistemas MIAF, tiende a conservar y acumular carbono en las capas de 0 a 15 cm de profundidad de la sección receptora de las terrazas, en algunos casos en más del 100% en comparación con sistemas tradicionales.

Respecto a la biota del suelo, investigaciones como las de Juárez-Ramón & Fragoso (2014), documentaron que las líneas de árboles frutales no presentaron comunidades de lombrices de tierra más diversas y abundantes, en diferentes sistemas de producción. Juárez-Ramón & Fragoso (2014) resaltaron la importancia de implementar técnicas de manejo para incrementar la talla de lombrices dado que la abundancia encontrada de estos organismos en sistemas de 9 y 11 años de establecimiento no alcanzó la cantidad recomendada para impactar la fertilidad del suelo. En otros grupos funcionales, Duché-García et al. (2021) encontraron mayor cantidad de actinomicetos totales ($>4 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo), actinomicetos fijadores de nitrógeno ($>3.8 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo) y hongos ($>1.7 \text{ Log UFC g}^{-1}$ suelo) en el sistema MIAF respecto a los monocultivos.

También se han realizado estudios sobre el uso de microorganismos para favorecer el establecimiento y desarrollo de los componentes de los sistemas MIAF. Por ejemplo, Romero-Figueiras et al. (2024) reportaron que la aplicación del tratamiento con *Rhizophagus irregularis* + *Rhizobium etli* + 50% de fertilización mineral incrementó la altura de los frutales en $68.5 \pm 8.6 \text{ cm}$ en limón persa (*Citrus latifolia*), $105.3 \pm 11.0 \text{ cm}$ en durazno (*Prunus persica*) y $6.8 \pm 4.5 \text{ cm}$ en lichi (*Litchi chinensis*). De igual forma, Martín-Canché et al. (2025) resaltaron los resultados obtenidos con un tratamiento de inoculación directa (sustrato y micorrizas 80/20) en maíz y jícama (*Pachyrhizus erosus*) en MIAF, el cual mostró una germinación del 95% y predominancia en la micorrización

6. Servicios ecosistémicos asociados a la hilera de perennes

Esta categoría temática integra investigaciones enfocadas en cuantificar la escorrentía superficial, la pérdida de suelo y nutrientes, así como las emisiones y almacenamiento de carbono en contextos de ladera, donde los procesos erosivos son críticos. Dentro de este grupo se encuentran los estudios de Camas Gómez et al. (2012) y Zetina-Lezama et al. (2023) quienes demostraron que el sistema MIAF, especialmente cuando incorpora filtros de escorrentía y coberturas vegetales permanentes (por ejemplo, maíz y frijol), reduce significativamente la escorrentía superficial y la pérdida de suelo en comparación con prácticas

tradicionales. En el caso de Camas Gómez et al. (2012) el MIAF presentó una degradación específica del suelo de solo 5.8 t ha^{-1} , frente a 16.8 t ha^{-1} en sistemas con laboreo de conservación, a pesar de tener una mayor pendiente. Esto refuerza la capacidad que tiene el MIAF para proteger los suelos en condiciones de alta vulnerabilidad.

Alrededor de la misma temática, en el trabajo de Zetina-Lezama et al. (2023), entre 2016 y 2018, se encontró que el sistema MIAF redujo la escorrentía superficial en un 46.13% respecto al tratamiento de labranza mínima, quema de residuos y rastreo. El sistema MIAF con chicozapote fue el más eficiente en reducir la escorrentía entre los sistemas con labranza y filtro.

Así también, el sistema MIAF mostró un comportamiento mixto en términos de pérdida de nutrientes. Según Camas Gómez et al. (2012), la pérdida de fósforo fue mayor en el MIAF debido a la aplicación de fertilizante fosfórico en árboles frutales, mientras que la pérdida de nitratos fue menor en comparación con otros sistemas como el de barreras de muro vivo. Este hallazgo sugiere la necesidad de un ajuste fino en los esquemas de fertilización en MIAF para equilibrar productividad y conservación.

Por su parte, Covalada et al. (2016) abordaron el papel del MIAF como práctica con co-beneficios: por un lado, permite reducir la presión sobre los bosques y, por otro, contribuye a mantener o incrementar las reservas de carbono del suelo. El estudio modeló los cambios de uso del suelo en Chiapas (2007–2011) y propuso al MIAF como una de las principales estrategias para reducir emisiones del sector (agricultura, silvicultura y otros usos del suelo), junto con labranza de conservación en los Altos de Chiapas.

También Novotny et al. (2024), como parte de su investigación reportaron que la presencia de árboles en la milpa aumenta la complejidad del paisaje, favoreciendo la biodiversidad y mejorando servicios ecosistémicos como la conservación del suelo y la captura de carbono, además de su contribución a la autosuficiencia nutricional e incremento de ingresos.

7. El sistema MIAF como política pública

Una temática de reciente surgimiento en torno al sistema MIAF es su análisis desde la perspectiva de política pública, particularmente a partir de su incorporación en el Programa Sembrando Vida (PSV). Este programa está promoviendo el MIAF en 24 entidades federativas del territorio mexicano para el ejercicio fiscal 2025 (Diario Oficial de la Federación, 2025). Las investigaciones aquí analizadas ofrecen una visión integral sobre la implementación del MIAF en el marco del PSV, abarcando desde la caracterización de los beneficiarios hasta evaluaciones participativas de su impacto ambiental, social y económico.

Desde una perspectiva cuantitativa, Capetillo Burela et al. (2024) realizaron un diagnóstico de 371 Unidades de Producción (UP) con MIAF en el estado de Hidalgo. El estudio señala que la mayoría de los beneficiarios son hombres de entre 41 y 60 años con escolaridad básica, y que las UP se ubican principalmente en zonas de lomerío con pendientes pronunciadas, en áreas cultivadas que suelen ser de una hectárea. Asimismo, se identificó que la mano de obra proviene tanto del núcleo familiar como de jornaleros externos, y que el financiamiento depende en esencia del apoyo gubernamental.

Complementando este análisis estructural, Montes-Ramírez & Sánchez-Juárez (2024) y Hernández Chontal et al. (2024) adoptaron un enfoque etnográfico orientado al actor, que permite explorar las experiencias y percepciones de los participantes en el programa. Ambos estudios coinciden en que el PSV ha contribuido a fortalecer la producción agroecológica, los medios de vida rurales y la autosuficiencia alimentaria. No obstante, también advierten sobre limitaciones estructurales, como la escasez de mano de obra joven, problemas técnicos y productivos, una fuerte dependencia del subsidio y la débil articulación con mercados.

Desde una perspectiva transversal e institucional, Cruz González (2024) analizó la implementación del PSV en los municipios de Rayón, Ciudad Valles, Villa de Reyes y Mexquitic de Carmona, en San Luis Potosí. El autor destaca tanto logros

como desafíos. Entre los avances se destacan las acciones de reforestación y el fortalecimiento de la cohesión social; no obstante, persisten diversos retos. En las zonas cercanas a las ciudades, por ejemplo, muchos jóvenes prefieren emplearse en la industria local o migrar a Estados Unidos. Asimismo, al interior de las comunidades aún se reproducen prácticas de sometimiento hacia las mujeres y la descalificación de sus capacidades. Otro aspecto pendiente para el PSV es el impulso al emprendimiento productivo.

8. Evaluación agroecológica

Una investigación que destaca por integrar varias dimensiones es la realizada por Ordoñez-Ovalle et al. (2022) en sistemas MIAF de Icalumtic, Municipio de Chamula, Chiapas. Los investigadores aplicaron un método de evaluación de la sustentabilidad agroecológica usando 30 indicadores cuantitativos y cualitativos, los cuales fueron definidos con la comunidad de manera participativa. Esta evaluación agroecológica mostró que los ejes ecológico-técnico-productivo y socio-político-cultural alcanzaron promedios de 8.16 y 7.23 respectivamente, indicando una sustentabilidad medianamente aceptable. Sin embargo, el eje socioeconómico obtuvo un promedio de 4.04, considerado como sustentabilidad no aceptable. Esto sugiere que, si bien el sistema es ambientalmente viable y socialmente valorado, presenta debilidades en la dimensión económica.

5.5.2. Análisis de avances de investigación en función de los propósitos del sistema MIAF

El sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) fue diseñado para cumplir con cuatro propósitos fundamentales: (1) incrementar el ingreso neto y el empleo familiar; (2) proteger el suelo contra la erosión; (3) fomentar la interacción entre cultivos para optimizar el uso de recursos; y (4) contribuir a la captura de carbono atmosférico. A continuación, se analiza cómo la investigación científica ha avanzado en la comprensión del desempeño del MIAF respecto a cada uno de estos propósitos.

El primer objetivo sobre el incremento del ingreso y empleo familiar ha sido abordado principalmente a través de estudios sobre rentabilidad, viabilidad económica, y formación de capital humano y social. Luna Méndez et al. (2016) y Cadena-Iñiguez et al. (2018) ofrecieron perspectivas contrastantes. Mientras el primero cuestiona la rentabilidad sin subsidios, el segundo destaca el potencial del MIAF en zonas marginadas. Esto evidencia la variabilidad del desempeño económico según región, enfoque metodológico y etapa de desarrollo del sistema.

En cuanto al capital humano y social, la formación técnica y la acción colectiva han sido identificadas como factores clave para mejorar la eficiencia productiva y la resiliencia económica (Capetillo Burela et al., 2024; Montes-Ramírez & Sánchez-Juárez, 2024).

Desde la perspectiva de política pública, investigaciones recientes revelan que el ingreso familiar mejora con el apoyo del Programa Sembrando Vida, pero existe una fuerte dependencia del subsidio y una débil vinculación al mercado (Capetillo Burela et al., 2024; Montes-Ramírez et al., 2024).

La protección del suelo del objetivo dos de proteger el suelo contra la erosión ha sido una de las dimensiones más documentadas en la literatura científica. Una de las temáticas que más contribuye son las características físicas, químicas y biológicas del suelo. Estudios como los de Torres Zambrano et al. (2021) y Arriaga-Vázquez et al. (2020) mostraron mejoras en pH, estructura, materia orgánica y biodiversidad edáfica.

También existe investigación desde la perspectiva de servicios ecosistémicos en laderas. Camas Gómez et al. (2012) y Zetina-Lezama et al. (2023) reportaron reducciones significativas en escorrentía y pérdida de suelo, validando el impacto del MIAF en zonas vulnerables a la erosión.

El objetivo tres referente a fomentar la interacción entre cultivos para optimizar el uso de recursos ha sido abordado desde la perspectiva de la eficiencia ecológica

del sistema y su diversidad funcional. Un grupo de trabajos que se clasificó como estudios de rendimiento y eficiencia del uso de la tierra, incluye la investigación de Torres Zambrano et al. (2008) y Tapia-Hernández et al. (2021) quienes destacaron una $ERT > 1$, evidenciando interacciones positivas entre cultivos. Así también, la incorporación de sotocultivos y el uso de arreglos topológicos alternativos han mostrado sinergias productivas (Muñoz-Ruiz et al., 2024; Ramírez-Maces et al., 2023).

Respecto al último objetivo sobre contribuir a la captura de carbono atmosférico, se encontraron los modelos de carbono que trabajó González-Molina et al. (2008, 2016), y Covalada et al. (2016) utilizaron herramientas como RothC para demostrar que el MIAF contribuye a la acumulación de carbono, especialmente en suelos con terrazas y manejo agroforestal.

Por su parte, Novotny et al. (2024) analizaron una aproximación a los incrementos en las reservas de carbono que puede ofrecer el sistema MIAF.

5.6. Conclusiones

El análisis de la investigación bibliométrica realizada sobre el sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales revela avances significativos en la comprensión de su desempeño como tecnología agroforestal, particularmente en relación con los propósitos para los cuales fue concebido. A partir de la diferenciación temática de los estudios, es posible identificar logros relevantes, así como vacíos de conocimiento que requieren atención en futuras investigaciones.

Primero, respecto al incremento del ingreso neto y el empleo familiar, la evidencia empírica es contrastante. Mientras algunos estudios destacan el potencial económico del sistema MIAF en contextos de alta marginación y diversidad productiva, otros advierten sobre su baja rentabilidad sin subsidios, lo que evidencia una fuerte dependencia del apoyo institucional. Además, la formación de capital humano y social ha sido fundamental para mejorar la eficiencia y adaptabilidad del sistema, aunque persisten barreras estructurales vinculadas a la asistencia técnica y la articulación con mercados.

Segundo, en cuanto a la protección del suelo contra la erosión, los resultados son contundentes. Diversas investigaciones demuestran que el MIAF contribuye a mejorar propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reduce la escorrentía y limita significativamente la pérdida de nutrientes, especialmente cuando se emplean prácticas como terrazas, labranza mínima y filtros vegetales. Esta función ha sido una de las más documentadas, confirmando la relevancia del sistema en territorios con alta vulnerabilidad edáfica.

Tercero, sobre el uso eficiente de recursos a través de la interacción entre cultivos, los estudios revisados muestran que el MIAF incrementa la eficiencia relativa del uso de la tierra (ERT), en comparación con monocultivos. La intercalación de cultivos anuales, los arreglos topológicos y el manejo integrado favorecen sinergias en el uso de luz, agua y nutrientes. Esta línea de investigación ha contribuido a visibilizar las ventajas ecológicas del diseño agroforestal del sistema.

Cuarto, en relación con la captura de carbono atmosférico, los resultados disponibles, aunque menos numerosos, indican que el MIAF puede contribuir a la acumulación de carbono en el suelo y la biomasa, especialmente cuando se incorporan frutales y prácticas agroecológicas. Sin embargo, esta dimensión aún requiere mayor profundización, particularmente mediante estudios de largo plazo y monitoreos sistemáticos.

Finalmente, el análisis transversal sugiere que el sistema MIAF ha sido abordado desde múltiples disciplinas y escalas, lo cual refleja su complejidad y riqueza como objeto de estudio. No obstante, también se identifican desafíos comunes: la necesidad de metodologías integradas para evaluar su desempeño, la escasa incorporación de perspectivas de género y bioculturales en las evaluaciones, y la falta de indicadores que capturen sus múltiples funciones en evaluaciones integrales.

5.7. Literatura citada

- Acosta-Mireles, M., Paz-Pellat, F., Hidalgo-Moreno, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2022). Patrones de distribución a profundidad del carbono orgánico del suelo en diferentes usos del suelo y manejo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1–19. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1321>
- Albino-Garduño, R., Turrent-Fernández, A., Cortés-Flores, J. I., Livera-Muñoz, M., & Mendoza-Castillo, M. C. (2015). Distribución de raíces y de radiación solar en el dosel de maíz y frijol intercalados. *Agrociencia*, 49(5), 513–531.
- Arriaga-Vázquez, A. M., Martínez-Menez, M. R., Rubiños-Panta, J. E., Fernández-Reynoso, D. S., Delgadillo-Martínez, J., & Vázquez-Alarcón, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa intercalada con árboles frutales. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(3), 465–474. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Balcazar Quiñones, A. P., Moctezuma Pérez, S., Vizcarra Bordi, I., & White Olascoaga, L. (2023). Resiliencia y autoorganización del grupo mazahua de milpa intercalada con árboles frutales (MIAF). *Sociedad y Ambiente*, 26, 1–27. <https://doi.org/10.31840/sya.vi26.2757>
- Becker, G. S. (1994). Human capital revisited. In *Human capital: A theoretical and empirical analysis with special reference to education* (3rd ed., pp. 15–28). The University of Chicago Press. <http://www.nber.org/chapters/c11229>
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H. del C., & González-Cifuentes, J. H. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351–1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Camas Gómez, R., Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Livera Muñoz, M., González Estrada, A., Villar Sánchez, B., López Martínez, J., Espinoza Paz, N., & Cadena Iñiguez, P. (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(2), 231–243.
- Capetillo Burela, Á., Zetina Lezama, R., Reynolds Chávez, M. A., Morales Guerra, M., Matilde Hernández, C., Camporredondo Mora, R., Peralta Antonio, N., & Nataren Velázquez, J. (2024). Situación actual de las pequeñas unidades de producción familiar en el estado de Hidalgo, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), Article e71031. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-120>
- Covaleda, S., Paz, F., & Ranero, A. (2016). Carbono edáfico en Chiapas: planteamiento de políticas públicas de mitigación de emisiones. *Terra Latinoamericana*, 34, 97–112.
- Cruz González, L. D. (2024). Sembrando Vida en San Luis Potosí. Organización y resultados en materia ambiental, social y economía local. *Revista Políticas Públicas*, 17(1), 3–28.

- Diario Oficial de la Federación. (2025). Reglas de operación del programa Sembrando Vida para el ejercicio fiscal 2025.
- Duché-García, T. T. A., Ocampo-Fletes, I., Cruz-Hernández, J., Hernández-Guzmán, J. A., Macías-López, A., Jiménez-García, D., & Hernández-Romero, E. (2021). Grupos microbianos en un agroecosistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales en Valles Alto de Puebla, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(2), Article 72. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3668>
- Fonteyne, S., Silva Avendaño, C., Ramos Sanchez, A., Torres Zambrano, J. P., García Dávila, F., Pérez Martínez, Z., García Dávila, A., Castillo Villaseñor, L., & Verhulst, N. (2022). Innovating traditional production systems through on-farm conservation agriculture and agroforestry research. *Frontiers in Agronomy*, 3, Article 787507. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.787507>
- Hernández Chontal, Á. Y., Ramírez-Valverde, B., Juárez Sanchez, J. P., Gallardo López, F., & Ocampo Fletes, I. (2024). Análisis cualitativo de la contribución de "Sembrando Vida" en el alivio de la pobreza. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 12(26), 1–19. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.86688>
- Hernández-Escobar, M. R., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., & Camas-Gómez, R. (2024). Maíz y frijol en MIAF con diferentes labranzas y arreglos topológicos. *Terra Latinoamericana*, 42, Article e1388, 1–6. <https://doi.org/10.28940/terra>
- Juárez Paulín, A., Tuñón Pablos, E., Winton, A., & Zapata Martelo, E. (2018). Relaciones socio-espaciales de género y participación de las mujeres en el proyecto Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) en Chiapas. *Revista Interdisciplinaria de Estudios de Género de El Colegio de México*, 4, Artículo e208. <https://doi.org/10.24201/eg.v4i0.208>
- Juárez-Ramón, D., & Fragoso, C. (2014). Comunidades de lombrices de tierra en sistemas agroforestales intercalados, en dos regiones del centro de México. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(3), 637–654. <https://doi.org/10.21829/azm.2014.30383>
- Leoni, S. (2025). A historical review of the role of education: From human capital to human capabilities. *Review of Political Economy*, 37(1), 227–244. <https://doi.org/10.1080/09538259.2023.2245233>
- López Gaytán, J., Jiménez Sánchez, L., León Merino, A., Figueroa Rodríguez, Ó. L., Morales Guerra, M., & González Romero, V. (2008). Escuelas de campo, para capacitación y divulgación con tecnologías sustentables en comunidades indígenas. *Agricultura Técnica En México*, 34(1), 33–42. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v34n1/v34n1a4.pdf>
- Luna Méndez, N., Jaramillo Villanueva, J. L., & Escobedo Garrido, J. S. (2016). Rentabilidad y competitividad del cultivo de nuez de Castilla en Sierra Nevada-Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1625–1638. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i7.155>
- Luna-Méndez, N., Jaramillo-Villanueva, J. L., Ramírez-Juárez, J., Escobedo-Garrido, S., Bustamante-González, Á., & Campos-Ríos, G. (2013). Tipología de unidades de producción de nuez de castilla en sistema de

- producción tradicional. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(3), 283–303. <https://www.revista-asyd.mx/index.php/asyd/article/view/1195>
- Martín-Canché, B. del R., Rodríguez-Ávila, N. L., Verdel-Aranda, K., Vanoye-Eligio, M., Cetzal-Ix, W., Casado-Ramírez, E. del J., & Guillen-Taje, J. L. (2025). Riqueza de hongos micorrícicos arbusculares asociadas a especies forestales en el sureste del estado de Campeche, México. *Terra Latinoamericana*, 43, 1–11. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2031>
- Martínez Gómez, G., Santos Corral, M. J., de Gortari Rabiela, R. N., Romo Lozano, J. L., & Vega Martínez, D. (2021). Cooperative learning for the transfer of MIAF technology: the mixes of Oaxaca. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 12(1), 91–102.
- Montes-Ramírez, K. A., & Sánchez-Juárez, G. K. (2024). Programa Sembrando Vida en el municipio San Miguel Talea de Castro, Oaxaca, México. Estudios Sociales. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 34(63), 1-26. <https://doi.org/10.24836/es.v34i63.1420>
- Morales-Guerra, M., Cadena-Pérez, K. Y., Cadena-Iñiguez, P. C., Berdugo-Rejón, J. G., Rodríguez-Hernández, F. R., & Cuevas-Reyes, V. (2024). Learning by doing, an innovative approach to sharing knowledge with indigenous farmers and elderly adults. *Creative Education*, 15, 407–417. <https://doi.org/10.4236/ce.2024.153025>
- Muñoz-Ruiz, E., Santiago-Mejía, H., Ronquillo-Cedillo, I., Albino-Garduño, R., Cortés-Flores, J. I., & Grossman, J. (2024). Vegetative growth of peach trees [*Prunus persica* (L.) Batsch] associated with native squash (*Cucurbita pepo* ssp. *pepo* L.) and bayocote (*Phaseolus coccineus* L.) in Milpa Intercropped with Fruit Trees system (MIAF) systems. *Agrociencia* 58(5), 543-556. <https://doi.org/10.47163/agrociencia>
- Novotny, I. P., Rossing, W. A. H., Tiftonell, P., Fuentes-Ponce, M., & Groot, J. C. J. (2024). Exploring nutrient-sensitive landscape configurations for rural communities in southern Mexico. *Landscape and Urban Planning*, 246, Article 105041. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105041>
- Ordoñez-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. *Revista Campo-Territorio*, 17(48), 109–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.14393/RCT174867657>
- Orozco Cirilo, S., Ramírez Valverde, B., Ariza Flores, R., Jiménez Sánchez, L., Estrella Chulim, N., Peña Olvera, B. V., Ramos Sánchez, Á., & Morales Guerra, M. (2009). Impacto del conocimiento tecnológico sobre la adopción de tecnología agrícola en campesinos indígenas de México. *Interciencia*, 34(8), 551–555. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33913144005>
- Ortiz-Jiménez, B., Vásquez-Ortiz, F., & Ramírez-Cuevas, C. (2023). Aprendizaje, capital social y redes sociales, en productores de la Mixteca Alta de Oaxaca. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20(1), 25–40.
- Ostrom, E., & Ahn, T. K. (2003). Una perspectiva del capital social desde las ciencias sociales: capital social y acción colectiva. *Revista Mexicana de Sociología*, 65(1), 156–233.

- Pillado Albarrán, K. V., Albino Garduño, R., Santiago Mejía, H., & Pedraza Mandujano, J. (2023). Capital social y acción colectiva para consolidar el MIAF mazahua. *Revista De Estudios Regionales Nueva Época*, 1(2), 26–45. <https://doi.org/10.59307/terne1.229>
- 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), Artículo e221247. <https://doi.org/10.24836/es.v32i60.1247>
- Rahe, M. L., Van Leuven, A. J., & Malone, T. (2025). Leveraging social ties to financial gains: Exploring the impact of social capital in rural development. *Journal of Rural Studies*, 114, Article 103539. <https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2024.103539>
- Ramírez-Maces, H. O., Tadeo-Robledo, M., Villegas-Aparicio, Y., Aragón-Cuevas, F., Martínez-Gutiérrez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Espinosa-Calderón, A., & De la O Olán, M. (2023). Diversidad biológica del sistema milpa y su papel en la seguridad alimentaria en la Sierra Mixe, Oaxaca. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 46(2), 105–113. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.105>
- Romero-Figueiras, T., Andrés-Meza, P., Murguía-González, J., Espinosa-Calderón, A., Maldonado-Saavedra, O., & Leyva-Ovalle, O. R. (2024). The role of microbial fertilizers in diversified cropping systems. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 11(3), Article e4007. <https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4007>
- Tapia-Hernández, A., Aldasoro-Maya, E. M., & Rodríguez-Robles, U. (2021). De sotocultivos para el sistema MIAF al diálogo de saberes en una comunidad mazahua: una travesía transdisciplinaria. *Nova Scientia*, 13(3), 1–38. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2831>
- Tapia-Hernández, A., Aldasoro-Maya, M. E., Rodríguez-Robles, U., Martínez-Zurimendi, P., & Rosset, P. (2024). Milpa intercalada con árboles frutales: revisión y estudio de caso en el Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(2), 168–185. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1580>
- Torres Zambrano, J. P., Cortés Flores, J. I., Turrent Fernández, A., Hernández Romero, E., & Muratalla Lúa, A. (2008). Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalados con milpa. *Terra Latinoamericana*, 26(3), 265–273. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Torres Zambrano, J. P., Cortés Flores, J. I., Turrent Fernández, A., Volke Haller, V. H., Ortiz Solorio, C. A., & Jiménez López, A. (2021). Caracterización físico-química y clasificación del suelo de ladera manejado bajo el sistema Milpa Intercalada con árboles frutales. *Teknos Revista Científica*, 21(2), 35–45. <https://doi.org/10.25044/25392190.1031>
- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., Hernández Romero, E., Camas Gómez, R., Torres Zambrano, J. P., & Zambada Martínez, 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.
- Vergara-Sánchez, M. A., & Etchevers-Barra, J. D. (2006). Relación entre el uso de la tierra y su fertilidad en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 40(5), 557–567.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30240501>
- Zambada-Martínez, A., Cadena-Iñiguez, P., Ayala-Sánchez, A., Sedas-Larios, L. E. I., Pérez-Guel, R. O., Francisco-Nicolás, N., Meneses-Márquez, I., Jacomé-Maldonado, S. M., Berdugo-Rejón, J. G., Morales-Guerra, M., Rodríguez-Hernández, F. R., & Rendón-Medel, R. (2013). Red de articulación institucional y organizacional para gestionar innovaciones en la Región de Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(4), 443–458.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360533097005>
- Zetina-Lezama, R., Uribe-Gómez, S., Capetillo-Burela, Á., Francisco-Nicolás, N., Hernández-Estrada, C. A., & Reynolds-Chávez, M. A. (2023). Descriptive study of the capacity of six hillside soil management systems in the control of surface runoff. *Agrociencia*, 57(1), 150–176.
<https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i1.2408>

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE LA MULTIFUNCIONALIDAD DEL SISTEMA MILPA INTERCALADA CON ÁRBOLES FRUTALES. UNA PROPUESTA BASADA EN MÉTODOS DE ANÁLISIS MULTICRITERIO⁶

6.1. Resumen

El sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una tecnología agroforestal que ha demostrado ser una opción efectiva para mejorar la productividad y resiliencia de terrenos agrícolas. Debido a su complejidad funcional, evaluar su multifuncionalidad (MF) requiere métodos que integren múltiples dimensiones. En esta investigación se desarrolló una metodología de evaluación de la MF del sistema MIAF, basada en Métodos de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones, mediante un marco que vincula los objetivos del sistema con indicadores sociales y ambientales. La metodología incorpora criterios cualitativos y cuantitativos, además de diferentes esquemas de ponderación, lo que permite realizar una evaluación integral, adaptable a distintos contextos. Los métodos de suma ponderada, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) fueron aplicados con datos de sistemas MIAF y otros agroforestales circundantes, en cuatro escenarios de ponderación. La ejemplificación con las ponderaciones definidas identificó criterios con mayor influencia en el posicionamiento, como las prácticas de conservación de suelo y agua, la captura de CO₂eq y la presencia de especies con valor cultural. La aplicación práctica permitió también detectar áreas de mejora, como la necesidad de desagregar ciertos indicadores, incorporar subcriterios y ajustar funciones de preferencia. Estas observaciones destacan la flexibilidad y utilidad de los métodos multicriterio para evaluar agroecosistemas complejos como el MIAF. En conjunto, la propuesta metodológica representa una

⁶ Este capítulo aún no ha sido enviado a revista para su publicación.

herramienta valiosa para apoyar procesos de toma de decisiones en contextos diversos.

6.2. Abstract

The Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) system is an agroforestry technology that has proven to be an effective option for improving the productivity and resilience of agricultural land. Due to its functional complexity, assessing its multifunctionality (MF) requires methods that integrate multiple dimensions. In this study, a methodology was developed to evaluate the MF of the MIAF system, based on Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) methods, using a framework that links the system's objectives with social and environmental indicators. The methodology incorporates both qualitative and quantitative criteria, along with different weighting schemes, allowing for a comprehensive and context-adaptable evaluation. The Weighted Sum, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), and PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) methods were applied using data from MIAF systems and neighboring agroforestry systems under four weighting scenarios. The application of the defined weights identified the most influential criteria in the rankings, such as soil and water conservation practices, CO₂eq capture, and the presence of culturally significant species. The practical implementation also revealed areas for improvement, including the need to disaggregate certain indicators, incorporate sub-criteria, and refine preference functions. These findings highlight the flexibility and utility of multi-criteria methods for evaluating complex agroecosystems such as MIAF. Overall, the proposed methodology represents a valuable tool for supporting decision-making processes in diverse contexts.

6.3. Introducción

El sistema Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF) es una tecnología agroforestal desarrollada hace más de 30 años que ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la productividad y resiliencia de terrenos agrícolas

en condiciones de deterioro. Este sistema integra cultivos anuales, árboles frutales y el manejo del suelo en una unidad productiva que promueve la estabilidad del agroecosistema mediante interacciones sinérgicas entre sus componentes (Cadena-Iñiguez et al., 2018; Tapia-Hernández et al., 2024; Turrent Fernández et al., 2017). Tales interacciones favorecen la retención de humedad, la fertilidad del suelo, la biodiversidad funcional y la regulación climática, atributos que respaldan su potencial para aplicarse en diversas regiones y contextos socioecológicos (Arriaga-Vázquez et al., 2020; Zetina-Lezama et al., 2023).

Lo anterior guarda una estrecha relación con la multifuncionalidad (MF) de la agricultura que se refiere a la capacidad de los agroecosistemas para proporcionar simultáneamente múltiples funciones o servicios ecosistémicos — como la producción de alimentos, la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica y climática, entre otros—. Cabe aclarar que en esta investigación se reconoce que las actividades agrícolas generan efectos tanto positivos como negativos, dentro y fuera de las unidades de producción, por lo que una evaluación integral debe identificar aquellos sistemas que maximizan beneficios y minimizan externalidades negativas. En este sentido, el MIAF se presenta como un caso representativo de MF, al conjugar funciones ecológicas, productivas y sociales en general, en un solo sistema.

Además de sus funciones descritas, el MIAF incorpora conocimientos tradicionales y prácticas locales adaptadas al entorno, lo que refuerza su viabilidad social, en particular en temas culturales (Pillado-Albarrán et al., 2022; Tapia-Hernández et al., 2021). Diversos estudios han documentado cómo la interacción entre cultivos anuales, árboles frutales y biodiversidad asociada permite una mayor eficiencia en el uso de recursos (Ramírez-Maces et al., 2023), un mejor control biológico de plagas (Ordoñez-Ovalle et al., 2022) y un incremento en la resiliencia del sistema ante perturbaciones externas. Estas características hacen del MIAF un modelo relevante para avanzar hacia sistemas agrícolas más sostenibles.

No obstante, evaluar su MF representa un desafío, debido a la complejidad inherente del sistema y la diversidad de beneficios que ofrece. Como señalaron Andrich & Marais (2019), es importante distinguir entre evaluación y medición: la evaluación, de carácter cualitativo o mixto, permite establecer marcos de análisis comprensivos que, posteriormente, pueden traducirse en variables cuantificables. Este enfoque es especialmente pertinente para sistemas complejos como el MIAF, donde es necesario integrar conocimientos de las ciencias naturales y sociales, considerando tanto los procesos biofísicos como las percepciones y experiencias de los actores involucrados.

En este contexto, los métodos de análisis multicriterio (MCDA, Multi-Criteria Decision Analysis o Multi-Criteria Decision Making) emergen como herramientas adecuadas para abordar dicha complejidad. Estos métodos permiten integrar criterios de diversa índole —ambientales y sociales— y considerar simultáneamente distintos niveles de importancia o prioridad entre ellos. Los MCDA son considerados un procedimiento sistemático, transparente y replicable para seleccionar entre diversas alternativas, mediante la integración de información cualitativa proveniente de juicios, percepciones u opiniones de actores relevantes sobre el objeto de estudio que se puede combinar con datos obtenidos a través de técnicas de estadística paramétrica y no paramétrica (Alinezhad & Khalili, 2019; Ishizaka & Nemery, 2013).

En investigaciones afines, como las desarrolladas por Cicciù et al. (2022), los MCDA han mostrado ser eficaces para evaluar sistemas agrícolas desde la perspectiva de la MF. Su aplicación en el caso del MIAF ofrece un enfoque integrador para identificar prácticas que promuevan sus beneficios y permitan compararlo con otros sistemas agroforestales en condiciones similares.

La conjunción entre el concepto de MF, las propiedades del sistema MIAF y los métodos de análisis multicriterio constituye una base sólida para desarrollar una evaluación integral, contextualizada y útil para la toma de decisiones. Bajo estos argumentos, en la presente investigación se plantearon los objetivos, 1) proponer una metodología de evaluación de la multifuncionalidad del sistema MIAF basada

en Métodos de Análisis Multicriterio para la Toma de Decisiones, mediante un marco que vincula los objetivos del sistema de interés con indicadores y variables específicas, como una aportación a las opciones de evaluación integral de este agroecosistema, 2) analizar la aplicación de la metodología generada mediante la información obtenida sobre sistemas MIAF y otros sistemas agroforestales circundantes, en diferentes escenarios de importancia de indicadores y variables, como demostración de herramienta potencial en la evaluación integral del sistema de interés.

6.4. Materiales y métodos

La metodología propuesta para evaluar la MF del sistema MIAF se refiere al análisis de la capacidad de esta tecnología para proporcionar múltiples servicios ecosistémicos de manera simultánea. En la literatura, estos servicios también se denominan funciones ecosistémicas o bienes y servicios, dependiendo del enfoque conceptual. Aunque el término fue adoptado desde hace varios años (De Groot et al., 2002; Millennium Ecosystem Assessment [MEA], 2005), persiste cierta ambigüedad en la vinculación de indicadores productivos con categorías específicas de servicios ecosistémicos. En esta investigación, se asume que dichos indicadores corresponden al análisis de la categoría de servicios ecosistémicos de aprovisionamiento o abastecimiento.

Como se expuso en la introducción, la MF implica considerar tanto los efectos positivos como los negativos generados por el sistema, tanto al interior de la unidad de producción como en su entorno. Por ello, se propone un análisis integral de carácter holístico, orientado a identificar aquellos sistemas que maximizan beneficios mientras minimizan externalidades negativas.

6.4.1. Estrategia metodológica

La **primera etapa** de la propuesta consistió en definir las directrices para seleccionar los indicadores y las variables a incluir en la evaluación. Como referencia se utilizó un manual público sobre construcción de indicadores (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL],

2013). A partir de las pautas y definiciones de este documento, se identificaron primero los objetivos del sistema objeto de estudio y, de manera subsecuente, los factores relevantes asociados a dichos objetivos. Ambos elementos constituyeron la base metodológica de esta etapa.

De acuerdo con Turrent Fernández et al. (2017), el sistema MIAF tiene como objetivos: 1) incrementar significativamente el ingreso neto y el empleo familiar, sin dejar de producir sus alimentos básicos; 2) proteger el suelo contra la erosión, sin eliminar su roturación excepto en condiciones especiales; 3) fomentar la interacción entre los cultivos componentes, para una mayor economía del uso de los recursos naturales y los insumos importados a la parcela; y 4) incrementar la captura del carbono atmosférico. Estos objetivos orientan la definición de indicadores clave para evaluar el sistema, los cuales deben considerar las características particulares de las unidades de producción donde se implementa el sistema MIAF.

En relación con el objetivo de “incrementar el ingreso neto y el empleo familiar”, se asumió que este propósito no solo se logra a través de las ventas, sino también mediante la reducción de egresos, un aspecto especialmente relevante en contextos de agricultura de autoconsumo, en parcelas de pequeña escala y con manejo predominantemente familiar. Esta lógica se vincula directamente con el objetivo de “fomentar la interacción entre cultivos”, ya que dicha interacción debe favorecer una mayor disponibilidad de alimentos dentro del sistema, reduciendo así la necesidad de adquirirlos externamente. Además, al diversificar la producción, los sistemas MIAF incrementan su resiliencia frente a perturbaciones externas y amplían las oportunidades para generar ingresos. A partir de este enfoque, se identificaron cinco aspectos clave para analizar el funcionamiento económico del sistema, en términos de ingresos y egresos: mano de obra, insumos, equipo y herramientas, acceso al mercado, y el contexto social y ambiental en el que opera.

Con respecto a “proteger el suelo contra la erosión”, es un objetivo totalmente relacionado con la formación de la terraza mediante la hilera de la especie como

posible generadora de ingresos. De manera adicional, en esta propuesta se reconoce el valor de cualquier otra forma de conservación del suelo y del agua que implementen en el sistema.

De manera similar al anterior objetivo, “incrementar la captura de carbono” se encuentra vinculado con la especie posible generadora de ingresos que en esencia es perenne y, por lo tanto, captura y almacena el carbono. Cabe resaltar que existen modificaciones en los sistemas MIAF a los modelos originales, que favorecen en este indicador. Un ejemplo de esto, son algunos de los analizados en la presente investigación, establecidos en superficies con presencia de árboles de interés para el productor, quién optó por una imbricación entre las especies perennes existentes y las que se incorporaron al sistema, en hileras.

Una circunstancia de suma importancia sobre el contexto social en los que operan los sistemas de interés es que prácticamente todos los sistemas MIAF se encuentran en zonas rurales, en muchos casos pertenecen a grupos indígenas, que practican sus creencias y tradiciones de manera arraigada, las cuales se apoyan en los recursos naturales que tienen a su disposición. En ese sentido, la agricultura en estas regiones guarda estrecha relación con los usos y costumbres de los productores y sus vecinos de la comunidad (Fonseca Sánchez, 2022).

En la **segunda etapa** de la propuesta se definieron indicadores que se relacionaron con cada uno de los objetivos del sistema MIAF, basados en los principios de claridad, relevancia y economía de indicadores establecidos en el manual del CONEVAL (2013). A continuación, se explican cada uno de los indicadores o variables que se proponen para esta metodología de evaluación.

Rendimiento del cultivo principal (1S). Este indicador permitirá valorar el aspecto productivo del sistema. En esta propuesta se hace referencia al cultivo principal, bajo el supuesto de que esta información es accesible para el productor, ya sea porque la conoce con cierta precisión o puede proporcionar datos que faciliten su estimación, incluso si no lleva registros formales del manejo de su sistema. En sistemas de mayor escala orientados principalmente a la

comercialización o en los cuales sea posible obtener información más detallada sobre las cantidades producidas de diversos cultivos, se podría realizar un ajuste al indicador o también reemplazarse por otro que capture estos datos y así se enriquezca el análisis con datos más precisos.

Número de productos adicionales al principal que son para autoconsumo (2S). En el contexto de una agricultura orientada al autoconsumo, este indicador destaca la capacidad del sistema para proveer más de un producto. Los sistemas que incluyan cultivos adicionales al maíz recibirán una mejor valoración. También se consideran productos no alimenticios utilizados con fines medicinales, religiosos o culturales dentro del hogar y la comunidad, siempre que su intercambio no implique un ingreso monetario.

Aportación al autoconsumo familiar (3S). El indicador se obtiene de la relación de la producción obtenida del sistema entre el requerimiento promedio de autoconsumo familiar, en porcentaje. El autoconsumo familiar promedio, para la metodología que se presenta en este manuscrito, se refiere a las necesidades alimenticias del maíz como cultivo principal del conjunto de familias propietarias de los sistemas analizados. Sin embargo, podrían utilizarse datos promedio de la localidad o región para considerar el contexto social de las necesidades que deben atender los sistemas de producción en esas localidades.

Relación de jornales y producción (4S). El planteamiento se refiere a la relación que guarda el valor monetario de la mano de obra empleada (jornales) y el valor del producto o productos principales obtenidos del sistema. Este indicador permite identificar las demandas laborales del sistema en función del rendimiento económico que genera.

Relación del ingreso por el producto comercial y el valor de la producción principal (5S). Este indicador relaciona el ingreso neto por la venta de los productos más importantes para el productor con el valor de la producción principal del sistema. El resultado ofrece una aproximación a la rentabilidad del sistema. Dada la dinámica de los sistemas analizados para la ejemplificación de

la metodología (presentada en posteriores apartados), es frecuente que los productores no registren ingresos por productos comercializados en pequeñas cantidades o de manera esporádica; por ello, se considera únicamente el ingreso neto generado por los productos más relevantes.

Integración al mercado (6S). Esta es una variable ordinal que se refiere a la situación que presenta la comercialización de la producción del sistema. En esta propuesta se emplearon tres categorías, donde el valor 3 representa el mayor grado de integración al mercado (ver Cuadro 5).

Presencia de especies con valor cultural (7S). La forma de valorar esta variable es básicamente si dentro del sistema existen especies que representen la cultura (maíz criollo, especies ornamentales para rituales religiosos o medicina tradicional, entre otras).

Existencia de prácticas de conservación del suelo y agua (8A). A partir de las prácticas reportadas en la bibliografía se generaron categorías (ver Cuadro 5), que otorgan mayor puntuación a los sistemas que incorporan un mayor número de prácticas, tales como: incorporación de materia orgánica, rotación de cultivos, prácticas de compostaje, cultivos de cobertera (abono verde), surcado en contorno y/o terraceo, labranza cero o reducida, cobertura vegetal muerta (mulch) y barreras vivas.

Captura de CO₂eq (9A). El indicador se refiere a la cantidad de carbono capturado y almacenado por las especies perennes del sistema. La estimación de este indicador se realizó mediante ecuaciones alométricas que se presentan en el Apéndice 1.

Uso de pesticidas (10A). Esta variable diferencia los sistemas que utilizan pesticidas de aquellos que no lo hacen. Se emplea como un indicador indirecto del manejo del agroecosistema que se puede ajustar en función del contexto social como se explicará más adelante.

Una característica distintiva de la presente metodología es que basada en los objetivos del sistema MIAF permite incorporar de forma integrada tanto aspectos sociales como ambientales en el análisis. Los aspectos sociales se entienden como aquellos relacionados con los actores involucrados en las diferentes etapas del desarrollo del sistema hasta la comercialización, es decir, indicadores vinculados a las personas y su interacción con el sistema. Por su parte, los aspectos ambientales se refieren a aquellos que son valorados o cuantificados sobre los elementos bióticos o abióticos del agroecosistema y áreas circundantes. Mayores especificaciones sobre los indicadores y variables considerados en la evaluación se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Información de los indicadores propuestos para la evaluación del sistema MIAF.

Clave	Unidad	Tipo de variable	Categoría (según aplique)	Técnica de recolección de datos
1S	kg ha ⁻¹	Continua		Entrevista al productor
2S		Discreta		Entrevista al productor y observación directa
3S	%	Continua		Entrevista al productor
4S		Continua		Entrevista al productor e información del contexto
5S		Continua		Entrevista al productor e información del contexto
6S		Ordinal	1. No ha logrado comercializar el producto	Entrevista al productor
			2. Comercializa a través de intermediarios	
			3. Comercializa directo al consumidor	
7S		Dicotómica	1. No hay presencia 2. Hay presencia	Observación directa

8A		Ordinal	1. No hay prácticas 2. Hay menos de tres prácticas 3. Emplean tres o más prácticas	Observación directa
9A	kg CO ₂ eq ha ⁻¹	Continua		Medición de perennes y estimación mediante ecuaciones alométricas
10A		Dicotómica	1. No aplica pesticidas 2. Aplica pesticidas	Entrevista al productor

Los números 1, 2 y 3 (según aplique) de las categorías de los indicadores 6S, 7S, 8A y 10A son los que se presentan en la matriz de desempeño del Cuadro 7. La información del contexto se refiere a valores de costo promedio del jornal y de los productos comercializados en la región.

Aunque esta propuesta se basa en los objetivos de la tecnología, es posible identificar que la información considerada está vinculada a los distintos tipos de servicios ecosistémicos (MEA, 2005) que proveen los sistemas. Así, los indicadores del 1S al 6S se relacionan con la categoría de servicios de aprovisionamiento, al reflejar el desempeño del sistema en el suministro de alimentos, materias primas, combustible u otros productos para las familias, vecinos u otros actores sociales. El indicador 7S se vincula con los servicios ecosistémicos culturales. Dado que el sistema MIAF está diseñado para la construcción de terrazas mediante muros vivos, existe contribución en la formación del suelo, un servicio clasificado como de apoyo o soporte. Por su parte, la captura de CO₂ eq se asocia con los servicios de regulación, en particular con la regulación del clima. Finalmente, el último indicador constituye una aproximación indirecta al análisis de servicios ecosistémicos tanto de apoyo como de regulación.

6.4.2. Descripción de los sistemas objeto de análisis para la ejemplificación

Los sistemas de producción analizados se localizan en el municipio de Jonotla, Puebla, con excepción del sistema denominado Coyoltitán, ubicado en el municipio contiguo de Zoquiapan, Puebla. El clima en el área de estudio es cálido húmedo, con lluvias durante todo el año, temperaturas que oscilan entre 20 y

26 °C, y una precipitación anual que varía entre 2400 y 4100 mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2010).

Entre las especies perennes de mayor presencia en la zona se encuentran *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Pimenta dioica* y diversos frutales, principalmente *Citrus* spp., *Litchi chinensis* y *Musa* spp. Las especies maderables y la pimienta suelen ser individuos que germinaron de manera natural dentro de los sistemas de producción y que los productores conservan intencionalmente. También es común la presencia de *Gliricidia sepium*, *Bursera simarouba*, *Guazuma ulmifolia* y *Hamelia patens*, utilizadas como soporte para el apilado y secado de las plantas de maíz cuando por alguna razón se caen antes del tiempo de cosecha.

La agricultura de temporal orientada al autoconsumo constituye la principal actividad económica, desarrollada en superficies que generalmente no superan las 0.25 hectáreas y en terrenos con pendientes que varían entre 10% y 100%. Las labores agrícolas se realizan con labranza mínima, empleando herramientas manuales como chuzo, machete, azadón y, en algunos casos, desbrozadora.

La población del área de estudio es predominantemente indígena y hablante de la lengua náhuatl (INEGI, 2010). Los datos específicos de los sistemas utilizados para la aplicación de los MCDA se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Descripción de los sistemas de producción analizados para ejemplificar la aplicación de los MCDA.

Sistema (clave)	Características y contexto	Insumos	Mano de obra	Mercado
Baltazalco1 (Bal1)	MIAF (<i>P. dioica</i> y <i>Citrus latifolia</i>), además de especies maderables dispersas y otras perennes en contorno. Sistema rodeado de huertos frutales y cafetales.	El maíz semilla proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético.	Familiar, 11 jornales aprox. en total.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas
Coyoltitan (Coyol)	MIAF (<i>P. dioica</i> y <i>C. latifolia</i>), además, individuos dispersos de <i>G. ulmifolia</i> . Sistema	El maíz semilla proviene de una cosecha anterior.	Familiar y externo en ocasiones. En total 18	Aún no se ha vendido el producto

	rodeado de huertos de cítricos y <i>P. dioica</i> , y una carretera de terracería.	Aplican fertilizante sintético.	jornales aprox.	
Pochotitan1 (Poc1)	MIAF (<i>P. dioica</i> y <i>C. latifolia</i>), además de especies maderables dispersas y otras perennes en contorno. Sistema rodeado de cafetales y milpa.	El maíz semilla proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético y pesticidas de manera focalizada.	Familiar y externo en ocasiones. En total 11 jornales aprox.	Productos de la milpa se venden a vecinos del sitio.
Baltazalco2 (Bal2)	Milpa en curvas a nivel con muros vivos, además de especies dispersas de maderables, <i>P. dioica</i> , frutales y ornamentales diversos. Sistema rodeado de huertos frutales y milpa.	El maíz semilla, proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético y pesticidas de manera focalizada.	Familiar. En total 11 jornales aprox.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas y en otros municipios.
Pochotitan2 (Poc2)	Milpa y especies dispersas de maderables, <i>P. dioica</i> , frutales y ornamentales diversos. Sistema rodeado por MIAF, milpa y huerto <i>P. dioica</i> .	El maíz semilla, proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético y pesticidas de manera focalizada.	Familiar y externo en ocasiones. En total 26 jornales aprox.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas
Tecpantzingo1 (Tec1)	Milpa y especies dispersas de maderables, <i>P. dioica</i> y frutales diversos. Sistema rodeado de milpa y cafetal.	El maíz semilla, proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético y pesticidas de manera focalizada.	Familiar. En total 17 jornales aprox.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas
Tecpantzingo2 (Tec2)	MIAF (<i>Theobroma cacao</i> y <i>C. latifolia</i>), además de especies dispersas de maderables, <i>P. dioica</i> , frutales y ornamentales diversos.	El maíz semilla, proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético.	Familiar y externo en ocasiones. En total 20 jornales aprox.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas
Tecpantzingo3 (Tec3)	Milpa y perennes dispersas de <i>P. dioica</i> y	El maíz semilla, proviene de	Familiar. En total 21	Intermediarios que se

	frutales diversos. Sistema rodeado de milpa.	una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético y pesticidas.	jornales aprox.	encuentran en localidades vecinas
Tecpantzingo4 (Tec4)	Milpa y especies dispersas de maderables, <i>P. dioica</i> y frutales diversos. Sistema rodeado de milpa y área habitacional.	El maíz semilla, proviene de una cosecha anterior. Aplican fertilizante sintético.	Familiar. En total 12 jornales aprox.	Intermediarios que se encuentran en localidades vecinas

6.4.3. Información base para la aplicación de los MCDA

Los métodos de decisión multicriterio permiten comparar un conjunto de alternativas en función de múltiples criterios, facilitando la identificación de la opción más adecuada según las prioridades de los tomadores de decisiones. En esta propuesta metodológica se aplicaron tres enfoques: el método de suma ponderada, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations). El conjunto de datos correspondientes a cada criterio (1S, 2S, ..., 10A) evaluado en nueve sistemas de producción (alternativas) se presenta en el Cuadro 7, en forma de una matriz de decisión. Esta matriz representa la estructura general de los MCDA, pero contiene los datos específicos del estudio, por lo que también puede considerarse una matriz de desempeño.

Cuadro 7. Desempeño de cada alternativa (sistema) para cada criterio.

Sistema	Criterio									
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8A	9A	10A
Bal1	23	2	0.92	137.5	3.75	1	2	3	91,033	1
Coyol	210	2	13.84	14.58	0.5	1	1	3	329	1
Poc1	1015	14	27.67	4.71	0.9	3	2	3	80,541	2
Bal2	351	21	72.86	2.77	17.19	2	2	3	115,533	2
Poc2	960	18	166.02	1.81	3.27	2	2	2	50,931	2
Tec1	1167	13	129.13	1.47	3.5	2	2	2	69,929	2
Tec2	833	6	92.23	2.53	1.62	2	2	3	67,679	2
Tec3	700	10	129.13	1.88	4.67	2	2	2	33,208	2
Tec4	360	13	83.01	1.6	1.09	2	2	2	17,856	1

Los valores de las columnas 6S, 7S, 8A y 10A corresponden a las categorías que se explican en el Cuadro 5.

Los métodos de Suma Ponderada, TOPSIS y PROMETHEE comparten varias características clave que los hacen adecuados para el análisis multicriterio. En primer lugar, todos requieren la asignación de pesos a los criterios, lo que implica que el decisor debe definir la importancia relativa de cada uno. Además, es necesario especificar el sentido de optimización de cada criterio, es decir, si se desea maximizar (cuanto mayor sea el valor del criterio para una alternativa, mejor será esa alternativa en relación con ese criterio, por ejemplo, rendimiento) o minimizar (por ejemplo, uso de pesticidas). Los tres métodos permiten evaluar múltiples alternativas frente a múltiples criterios y pueden manejar tanto datos cuantitativos como cualitativos transformados. Aunque difieren en su lógica interna de evaluación, todos generan un ranking final de alternativas que sirve como guía para la toma de decisiones (Alinezhad & Khalili, 2019; Ishizaka & Nemery, 2013).

Además, se recalca que es indispensable contar con todos los valores de desempeño para cada alternativa y criterio. Los criterios deben estar expresados en escalas comparables o normalizadas, especialmente en suma ponderada y TOPSIS. En PROMETHEE, aunque no requiere normalización estricta, sí se requiere que las unidades y escalas permitan comparar diferencias; asimismo, se deben especificar los umbrales de preferencia o indiferencia de acuerdo con la función de preferencia (hay varios tipos) que se considere más apropiada para el tipo de variables. Diversos autores, como Alinezhad & Khalili (2019); Ishizaka & Nemery (2013); Shih (2021), describieron las características de los datos que deben ser consideradas para una adecuada selección de la función de preferencia.

Respecto a los umbrales para PROMETHEE, se calcularon como una proporción del rango, de 10% en indiferencia y 30% para preferencia. Esto es similar a la propuesta de Demircioğlu & Ulukan (2019) de utilizar porcentajes para determinar estos valores.

Cuadro 8. Sentido, pesos, funciones de preferencia y umbrales de cada criterio.

Clave	Sentido	wi E1	wi E2	wi E3	wi E4	Nombre función	q	P
1S	Max.	0.1	0.08	0.09	0.07	V-Shape con zona de indiferencia	96	383
2S	Max.	0.1	0.07	0.08	0.05	V-Shape con zona de indiferencia	2	8
3S	Max.	0.1	0.07	0.09	0.06	V-Shape con zona de indiferencia	15	61
4S	Min.	0.1	0.07	0.09	0.06	V-Shape con zona de indiferencia	1	5
5S	Max.	0.1	0.07	0.08	0.05	V-Shape con zona de indiferencia	2	7
6S	Max.	0.1	0.07	0.08	0.05	Nivel	0	1
7S	Max.	0.1	0.07	0.09	0.06	Usual	0	1
8A	Max.	0.1	0.17	0.13	0.2	Nivel	0	1
9A	Max.	0.1	0.17	0.14	0.2	V-Shape con zona de indiferencia	11520	46082
10A	Min.	0.1	0.16	0.13	0.2	Usual	0	1

Max.: maximizar; Min.: minimizar; wi E1, wi E2, wi E3, wi E4: escenarios de ponderación 1, 2, 3 y 4, respectivamente; q: umbral de indiferencia; p: umbral de preferencia.

Con el objetivo de mostrar los resultados considerando distintos niveles de importancia asignados a las dimensiones, se realizaron los cálculos bajo cuatro escenarios de distribución de pesos (Cuadro 8), lo cual constituye una forma de análisis de sensibilidad (de Oliveira et al., 2023; Ishizaka & Nemery, 2013). En la columna wi E1 se asignaron pesos iguales a cada uno de los diez criterios, sin distinción entre dimensiones. En la cuarta columna se aplicó una distribución equilibrada, con 50% del peso total asignado a cada dimensión (social y ambiental), y dicho porcentaje se repartió entre los indicadores correspondientes a cada una. La quinta columna representa un escenario en el que el 60% del peso se asigna a los indicadores sociales y el 40% a los ambientales. Por último, la sexta columna refleja una distribución inversa: 40% para los indicadores sociales y 60% para los ambientales. Estos cuatro escenarios de ponderación fueron aplicados en los tres MCDA y fueron el resultado del consenso de los autores de este manuscrito, quienes son especialistas en diferentes áreas del conocimiento.

El método de suma ponderada es una técnica sencilla y ampliamente utilizada en los MCDA. Consiste en evaluar cada alternativa en función de varios criterios.

Para ello, se asigna un valor numérico a cada alternativa por criterio, comúnmente en una escala normalizada (por ejemplo, de 0 a 1), que refleja su desempeño relativo. Posteriormente, cada valor se multiplica por el peso asignado al criterio correspondiente —el cual representa su nivel de importancia en la evaluación—. Finalmente, se suman estos productos para obtener una puntuación total por alternativa. La alternativa con la puntuación más alta se considera la opción más favorable, de acuerdo con los criterios definidos y su ponderación (Alinezhad & Khalili, 2019; Ishizaka & Nemery, 2013).

El método TOPSIS consiste en comparar distintas opciones evaluadas según varios criterios. Primero, se organiza una tabla con los valores de cada alternativa en cada criterio. Luego, estos valores se normalizan para que todos estén en la misma escala y se multiplican por la importancia (peso) de cada criterio. Después, se identifican los valores ideales (los mejores) y anti-ideales (los peores) por criterio. A continuación, se calcula qué tan lejos está cada alternativa del ideal y del anti-ideal. Con estas distancias, se obtiene un valor que indica qué tan cerca está cada opción del ideal. Finalmente, se ordenan las alternativas según este índice para elegir la mejor opción (de Oliveira et al., 2023; Ishizaka & Nemery, 2013).

El método PROMETHEE funciona comparando las alternativas dos a dos en cada criterio para calcular qué tanto una es preferida sobre otra. Primero, se transforma la diferencia entre los valores de cada par de alternativas en un valor de preferencia entre 0 y 1, usando una función apropiada según el tipo de dato. Luego, esas preferencias se ponderan según la importancia de cada criterio. A partir de ahí, se calcula para cada alternativa un flujo positivo (qué tanto domina a las demás) y un flujo negativo (qué tanto es dominada por las demás). Finalmente, se obtiene un flujo global que resulta de restar el negativo al positivo, y ese valor permite ordenar todas las alternativas desde la más favorable hasta la menos favorable (Alinezhad & Khalili, 2019; Ishizaka & Nemery, 2013; Shih, 2021).

Un aspecto importante para destacar es que la propuesta metodológica se desarrolló mediante un proceso iterativo, basado en información de campo obtenida en unidades productivas del sistema MIAF y de otros sistemas agroforestales. Este proceso incluyó visitas de campo (observación y mediciones) y entrevistas, las cuales permitieron realizar diversos ajustes a los indicadores.

6.5. Resultados y discusión

La propuesta metodológica de evaluación de la MF del sistema MIAF se basó en las funciones de interés declaradas para esta tecnología, las cuales se circunscriben en los objetivos. A su vez, estos se asociaron con características de los sistemas analizados (indicadores o variables cuantitativas y cualitativas) que en términos de los MCDA son criterios. Bajo la premisa de que la MF deseada es la que maximiza los beneficios positivos sobre los efectos negativos, se incluyeron los dos tipos de indicadores o variables. También se tomó en cuenta que en el análisis de los sistemas de producción se deben abordar aspectos sociales y ambientales, perspectiva que está considerada en los mismos objetivos del MIAF pero que es posible balancear con la distribución de las ponderaciones (Figura 5).

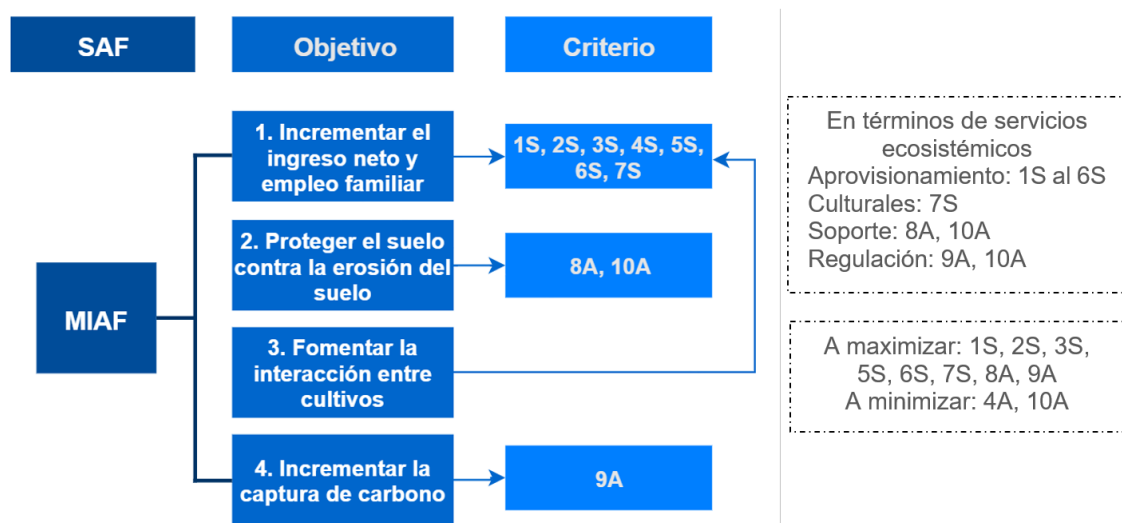


Figura 5. Marco sintetizado de la evaluación de la MF del sistema MIAF.

En síntesis, la metodología que se propone consiste en obtener los valores de los 10 indicadores sugeridos. Luego aplicar alguno de los MCDA otorgando las ponderaciones de alguno de los escenarios para obtener el posicionamiento o ranking de los sistemas de producción, en donde el número 1 sería considerado como el que opera de mejor manera entre los sistemas analizados. En los siguientes párrafos se analiza con mayor detalle el funcionamiento de los MCDA.

6.5.1. Aplicación del método Suma Ponderada

Los resultados presentados en el Cuadro 9 muestran que hay diferencias en la valoración de las múltiples funciones o servicios ecosistémicos según la ponderación utilizada en cada escenario. Al comparar el escenario 1, en el que se asigna el mismo peso a todos los criterios, con el escenario 3, que otorga mayor importancia a los aspectos sociales, se observa que cuatro sistemas (Coyol, Poc1, Bal2 y Tec4) conservaron su posición, mientras que los restantes cambiaron únicamente uno o dos lugares, lo que indica una variación mínima (observar la fila denominada “orden”). En contraste, la comparación entre los escenarios 1 y 2 (con distribución equilibrada entre dimensiones) muestra coincidencias en tres posiciones, pero también desplazamientos de hasta cuatro lugares, como ocurrió en los sistemas Bal1 y Poc2. El mayor contraste se presenta entre los escenarios 1 y 4 (mayor peso a lo ambiental), donde solo dos sistemas conservaron su posición original.

Cuadro 9. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante Suma Ponderada.

wi	Parámetro	Sistema								
		Bal1	Coyol	Poc1	Bal2	Poc2	Tec1	Tec2	Tec3	Tec4
E1	Yi	0.398	0.315	0.636	0.721	0.576	0.564	0.562	0.482	0.506
	Orden	8	9	2	1	3	4	5	7	6
E2	Yi	0.547	0.412	0.623	0.708	0.456	0.465	0.559	0.372	0.462
	Orden	4	8	2	1	7	5	3	9	6
E3	Yi	0.476	0.363	0.630	0.714	0.526	0.525	0.567	0.437	0.492
	Orden	7	9	2	1	4	5	3	8	6
E4	Yi	0.627	0.470	0.611	0.691	0.400	0.420	0.558	0.323	0.457
	Orden	2	5	3	1	8	7	4	9	6

Yi: puntuación total para cada sistema.

6.5.2. Aplicación del método TOPSIS

La aplicación de este método mostró que los escenarios 1 y 3 posicionan a cuatro sistemas de producción en el mismo orden de ranking (Cuadro 10). En términos generales, este método produce variaciones menos drásticas entre escenarios en comparación con el método de suma ponderada. Ejemplo de ello es que, además de la coincidencia en las posiciones mencionadas, los cambios más significativos no superaron los cuatro lugares. Esto se observa, por ejemplo, en la comparación entre los escenarios 1 y 4 para el sistema Bal1, el cual cambió cuatro posiciones con este método, mientras que en la suma ponderada llegó a desplazarse hasta seis lugares.

Cuadro 10. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante TOPSIS.

wi	Parámetros	Sistemas								
		Bal1	Coyol	Poc1	Bal2	Poc2	Tec1	Tec2	Tec3	Tec4
10%	d+	0.157	0.140	0.104	0.056	0.086	0.085	0.102	0.091	0.112
	d-	0.056	0.092	0.124	0.157	0.134	0.131	0.118	0.120	0.112
	Ca	0.263	0.397	0.545	0.738	0.609	0.608	0.536	0.568	0.500
	Orden	9	8	5	1	2	3	6	4	7
50% S 50% A	d+	0.113	0.133	0.082	0.050	0.085	0.077	0.085	0.096	0.111
	d-	0.086	0.073	0.110	0.142	0.103	0.108	0.100	0.088	0.084
	Ca	0.433	0.355	0.571	0.740	0.548	0.585	0.541	0.479	0.433
	Orden	7	9	3	1	4	2	5	6	8
60% S 40% A	d+	0.136	0.133	0.090	0.053	0.081	0.076	0.089	0.090	0.108
	d-	0.072	0.086	0.119	0.148	0.122	0.123	0.112	0.108	0.102
	Ca	0.347	0.392	0.569	0.737	0.600	0.617	0.557	0.546	0.486
	Orden	9	8	4	1	3	2	5	6	7
40% S 60% A	d+	0.094	0.133	0.074	0.051	0.087	0.075	0.079	0.102	0.113
	d-	0.101	0.071	0.109	0.141	0.093	0.103	0.098	0.078	0.078
	Ca	0.520	0.347	0.596	0.734	0.516	0.578	0.556	0.435	0.408
	Orden	5	9	2	1	6	3	4	7	8

d+ y d-: distancia de cada alternativa a las alternativas ideal y anti ideal, respectivamente; Ca: coeficiente de cercanía (entre más cercano esté a uno, es mejor).

6.5.3. Aplicación del método PROMETHEE

Como se explicó anteriormente, la aplicación del método PROMETHEE genera diferentes tipos de flujos; en particular, el flujo global permite establecer el ranking

de las alternativas o sistemas de producción. Tomando como ejemplo el sistema Bal2, su flujo global positivo refleja un alto grado de preferencia frente a las demás alternativas, lo que indica que supera a muchas de ellas en varios criterios. Por otro lado, el flujo global negativo es un reflejo de las alternativas que la superan; en este caso, un valor bajo también es favorable. La diferencia entre el flujo global positivo y el negativo da lugar al flujo global neto, el cual representa el balance global del desempeño de la alternativa. Dado que Bal2 obtuvo el valor más alto de flujo neto, se posiciona como la mejor alternativa global (Cuadro 11), de acuerdo con los criterios, pesos y funciones de preferencia utilizados.

Cuadro 11. Posicionamiento o ranking de los sistemas según los 10 criterios analizados mediante PROMETHEE.

wi	Parámetros	Sistemas								
		Bal1	Coyol	Poc1	Bal2	Poc2	Tec1	Tec2	Tec3	Tec4
10%	ϕ^+	0.211	0.143	0.352	0.454	0.334	0.321	0.262	0.264	0.244
	ϕ^-	0.461	0.624	0.217	0.154	0.177	0.173	0.206	0.275	0.297
	Φ	-0.250	-0.481	0.135	0.300	0.157	0.148	0.056	-0.012	-0.053
	Orden	8	9	4	1	2	3	5	6	7
50% S 50% A	ϕ^+	0.327	0.219	0.351	0.464	0.268	0.275	0.279	0.203	0.243
	ϕ^-	0.339	0.534	0.199	0.148	0.263	0.235	0.200	0.359	0.353
	Φ	-0.012	-0.315	0.153	0.316	0.005	0.040	0.079	-0.155	-0.110
	Orden	6	9	2	1	5	4	3	8	7
60% S 40% A	ϕ^+	0.270	0.179	0.347	0.454	0.304	0.302	0.272	0.236	0.245
	ϕ^-	0.401	0.586	0.212	0.152	0.217	0.200	0.201	0.314	0.325
	Φ	-0.131	-0.407	0.135	0.302	0.086	0.102	0.071	-0.079	-0.080
	Orden	8	9	2	1	4	3	5	6	7
40% S 60% A	ϕ^+	0.387	0.262	0.341	0.455	0.235	0.252	0.285	0.174	0.251
	ϕ^-	0.278	0.487	0.196	0.150	0.303	0.264	0.196	0.395	0.373
	Φ	0.109	-0.225	0.145	0.305	-0.068	-0.012	0.089	-0.221	-0.122
	Orden	3	9	2	1	6	5	4	8	7

ϕ^+ : flujo positivo; ϕ^- : flujo negativo; Φ : flujo neto.

Con este MCDA los resultados del escenario de ponderación 1 son muy similares al 3 según el posicionamiento de los sistemas, en solo dos no coinciden. En menor grado, pero si existe parecido en la clasificación entre el escenario 1 y 2, pues tres sistemas se colocan en el mismo lugar.

6.5.4. Interpretación del ranking o posicionamiento de los sistemas de producción

El ranking presentado en la fila denominada “orden” de los cuadros 9, 10 y 11 corresponde a los resultados obtenidos con la aplicación de los tres MCDA. Para ilustrar su interpretación, se analizan el primer y el último lugar.

El sistema Bal2 ocupa la mejor posición en los tres métodos, lo que indicó un desempeño integral favorable en la mayoría de los indicadores (ver Cuadro 7). Aunque no alcanzó el mayor rendimiento de maíz, presentó características destacadas, como la de requerir solo \$2.77 de jornal por cada peso del valor del maíz producido, ofrece la mayor diversidad de productos para autoconsumo, cubre el 72.86% de la necesidad de maíz de una familia promedio de tres integrantes, genera los ingresos más altos (\$17.19 por cada peso del valor del maíz), comercializa sus productos (a través de intermediarios), incorpora especies con valor cultural, aplica diversas prácticas de conservación y captura la mayor cantidad de CO₂eq debido al número y tamaño de árboles presentes. Estas cualidades explican su posición destacada en los indicadores sociales y ambientales.

En contraste, el sistema Coyol se ubica en la última posición. Su rendimiento es inferior al de Bal2, aporta solo dos productos para autoconsumo, cubre el 13.84% de la necesidad de maíz de una familia promedio, requiere \$14.58 de jornal por cada peso del valor del maíz producido y genera ingresos muy bajos (\$0.50 por cada peso del valor del maíz). Además, enfrenta dificultades para comercializar, carece de especies con valor cultural y registra la menor captura de CO₂ eq entre los nueve sistemas. Si bien incluye prácticas de conservación de suelo y agua y no aplica pesticidas, su desempeño integral —desde la perspectiva de los criterios sociales y ambientales— resulta el más limitado.

Los resultados del ranking aportan valor más allá de determinar un orden numérico; constituyen una herramienta para comprender el desempeño integral

de sistemas de producción complejos y apoyar la toma de decisiones. Su utilidad se puede resumir en diferentes temáticas como se explica a continuación.

Para la investigación y la práctica productiva permite identificar fortalezas y debilidades de cada sistema en diferentes dimensiones (social y ambiental), facilita comparar alternativas considerando múltiples criterios y prioridades locales, y sirve como base para replicar o adaptar sistemas mejor posicionados en contextos similares, promoviendo prácticas con múltiples funciones.

Para la toma de decisiones y la participación social proporciona información clara y comparable que favorece procesos participativos, donde productores, especialistas, entre otros actores, contribuyen en la evaluación y priorización de sistemas. También permite equilibrar la importancia de los aspectos ambientales y sociales frente a los intereses puramente productivos, ajustando pesos y criterios según consensos entre los interesados.

En la política pública, la utilidad del ranking se observa en la toma de decisiones basadas en datos empíricos. De esta forma se podrían orientar incentivos y programas hacia sistemas que combinan productividad con beneficios ambientales y sociales. Asimismo, podría apoyar la definición de criterios de asignación de apoyos y financiamientos, incorporando indicadores más amplios que el rendimiento.

6.5.5. Aspectos más relevantes entre los tres MCDA

El primer escenario, con igual ponderación para cada criterio, y el tercero, con una distribución de pesos social y ambiental (60%S–40%A), muestran cierta similitud en los resultados obtenidos con los tres MCDA, como se observa en el Cuadro 12. En otras palabras, asignar el mismo peso a todos los criterios —una práctica común en este tipo de análisis— genera resultados similares al escenario en el que se da mayor peso a los aspectos sociales. Al comparar ambos escenarios, se identificó que solo unos pocos sistemas modificaron su posición en el ranking. Esta similitud fue particularmente evidente en el método

PROMETHEE, donde únicamente los sistemas Poc1 y Poc2 intercambiaron posiciones entre ambos escenarios de ponderación.

Sobre el método PROMETHEE, puede considerarse que es el que mejor capta la sensibilidad de los productores debido a su capacidad para incorporar las preferencias relativas entre alternativas mediante funciones de preferencia y umbrales de indiferencia y preferencia. Este método permite modelar matices en la percepción de los informantes respecto a la importancia y el grado de diferencia entre criterios, a diferencia de los otros dos MCDA. Lo cual se traduce en una representación más realista y flexible de las valoraciones subjetivas, mostrando con mayor precisión la intensidad de las preferencias expresadas por los participantes en el análisis.

Cuadro 12. Comparativo de ranking entre MCDA y escenarios de ponderación.

Método	wi	Sistemas								
		Bal1	Coyol	Poc1	Bal2	Poc2	Tec1	Tec2	Tec3	Tec4
Suma Ponderada	10%	8	9	2	1	3	4	5	7	6
	50%S-50%A	4	8	2	1	7	5	3	9	6
	60%S-40%A	7	9	2	1	4	5	3	8	6
	40%S-60%A	2	5	3	1	8	7	4	9	6
TOPSIS	10%	9	8	5	1	2	3	6	4	7
	50%S-50%A	7	9	3	1	4	2	5	6	8
	60%S-40%A	9	8	4	1	3	2	5	6	7
	40%S-60%A	5	9	2	1	6	3	4	7	8
PROMETHEE	10%	8	9	4	1	2	3	5	6	7
	50%S-50%A	6	9	2	1	5	4	3	8	7
	60%S-40%A	8	9	2	1	4	3	5	6	7
	40%S-60%A	3	9	2	1	6	5	4	8	7

wi: ponderación. En el caso de 10% se refiere a que se asignó ese peso a cada criterio.

En los tres métodos de análisis, y bajo cualquiera de los cuatro escenarios de ponderación, el sistema Bal2 ocupa consistentemente el primer lugar. Esto indica un desempeño superior y, al mismo tiempo, equilibrado en relación con los criterios evaluados, en comparación con el resto de los sistemas. En contraste, los sistemas Coyol y Bal1 se ubican con mayor frecuencia en los últimos lugares de la clasificación.

Un análisis más detallado, a nivel general, revela que el criterio relacionado con la existencia de prácticas de conservación de suelo y agua fue determinante para que el sistema Poc1 alcanzara la segunda posición en varios escenarios y métodos. Otro criterio con gran influencia fue la estimación de la captura de CO₂ equivalente. A estos les siguieron, en orden de relevancia, la presencia de especies con valor cultural y la integración al mercado.

Durante los distintos ejercicios de aplicación de los MCDA, se identificó como área de mejora la necesidad de incorporar más indicadores en la dimensión ambiental. Esto se debe a que, al considerar únicamente los indicadores 8A y 9A para los objetivos 2 y 3 del sistema MIAF, respectivamente, se observaron variaciones sustanciales en los puntajes entre sistemas. Esta fue una de las razones por las cuales se decidió incluir el indicador 10A dentro de la dimensión ambiental, con el fin de distribuir los pesos de forma más equilibrada entre tres criterios. Cabe señalar que dicho indicador (10A) puede ofrecer información relevante sobre el manejo del agroecosistema, permitiendo abordar indirectamente aspectos relacionados con servicios ecosistémicos como la biodiversidad. Si bien no fue el objetivo y tampoco se plantea como una afirmación concluyente para los sistemas analizados, existe una percepción compartida por los propios productores, quienes han observado una disminución en la presencia de especies silvestres comestibles en parcelas donde se aplican pesticidas con mayor frecuencia o sin contar con la capacitación apropiada para el uso de estos insumos. La reducida superficie de producción hace que incluso errores mínimos en la aplicación de pesticidas resulten muy evidentes.

Además, el análisis de los sistemas evaluados permitió identificar que, en casos como el de Bal2 —que presenta un desempeño destacado en la mayoría de los criterios—, su posición consistente en el primer lugar dificulta atribuir su éxito a un criterio específico. Por ello, para identificar los criterios con mayor influencia en los resultados, se eligió el sistema Poc1 como caso de análisis, ya que obtuvo el segundo lugar en varios escenarios evaluados.

6.5.6. Análisis del funcionamiento de los indicadores definidos

De acuerdo con las referencias consultadas para el desarrollo de esta propuesta metodológica, los indicadores utilizados en una evaluación deben cumplir con ciertas características. En ese marco, se seleccionaron indicadores que, según el análisis realizado, cumplen con los criterios de claridad, relevancia y economía establecidos por el CONEVAL (2013).

No obstante, es posible sustituir algunos indicadores por otros, en función de limitaciones económicas, condiciones particulares del contexto, disponibilidad de información, u otras circunstancias que justifiquen el cambio. En tales casos, es fundamental declarar explícitamente qué parte del marco original está siendo reemplazada, evitar redundancias, y analizar minuciosamente cómo se ve afectado el desempeño y la validez del método aplicado.

En el caso del indicador 1S, se sugiere que podría ser reemplazado por el indicador de Eficiencia Relativa de la Tierra, el cual compara la productividad de un sistema de cultivo mixto con la de los cultivos en monocultivo en una misma superficie. Sin duda, si el productor cuenta con la información necesaria —o si se trata de una investigación con los recursos suficientes para recolectar dichos datos—, este indicador permitiría una evaluación más precisa de la eficiencia del sistema de producción.

En cuanto al indicador 2S, que busca reconocer la diversidad de productos ofrecidos por el sistema, se plantea la posibilidad de sustituirlo por algún índice de agrobiodiversidad o uno de naturaleza similar. Incluso podría desagregarse en dos subcriterios: uno que evalúe específicamente la diversidad de productos cultivados con fines alimentarios, y otro que considere la diversidad de especies no contempladas en el primer subcriterio, como aquellas de uso medicinal, ritual, leñero o forrajero.

Es importante tener en cuenta que los usos de las plantas varían entre regiones del país. En las localidades del presente estudio, por ejemplo, existen especies

que germinan de manera natural en los sistemas de producción y cuya permanencia es permitida por los productores debido a su fácil regeneración, o por los servicios que ofrecen, como sombra o provisión de leña. Sin embargo, estos mismos servicios pueden ser cumplidos por otras especies. En contraste, en otras regiones del país, algunas de estas especies son valoradas principalmente como forraje y tienen un uso más específico, por lo que su reemplazo no es tan sencillo. Dicho de otra forma, en el área de estudio, si una de estas especies tuviera que ser retirada, podría hacerse sin mayor implicación; mientras que, en otras zonas del país, la misma especie podría tener un valor considerable por su aporte al autoconsumo.

El indicador 3S, correspondiente a la aportación al autoconsumo, fue planteado con base en el cultivo principal, ya que el dinamismo del sistema dificultaba obtener datos precisos sobre la producción de los demás productos. No obstante, cualquier mejora en la precisión de los datos podría permitir una desagregación similar a la sugerida para el indicador anterior. Por ejemplo, se podrían establecer dos subcriterios: uno para el cultivo principal y otro para el resto de los productos destinados al autoconsumo.

En particular, para el criterio 4S —relacionado con los jornales—, la revisión de literatura sobre evaluaciones identificó algunas formas de abordar este aspecto. Algunos autores, por ejemplo, proponen clasificaciones según el tipo de jornal utilizado, como “jornal temporal”, “jornal familiar”, entre otras tipificaciones. No obstante, se consideró que la forma en que se plantea solo describe características del sistema, pero no evalúa directamente su eficiencia. Aun así, podría incorporarse eventualmente como subcriterio dentro de algún indicador relacionado con el uso de jornales, especialmente considerando la relevancia del tema en contextos donde se observan procesos de envejecimiento de los productores y escasez de mano de obra en diversas regiones de México (INEGI, 2023).

Así como en otros casos, se propone como futura mejora para 6S sobre integración al mercado, que cada producto comercializado sea valorado de

manera individual como un subcriterio, lo que permitiría un análisis más detallado y preciso. Otra opción serían manejar dos subcriterios, uno para los cultivos anuales y otro para la hilera de frutales. Asimismo, se podría incluir la categoría de trueque para el caso de las comunidades que los practiquen.

La presencia de especies con valor cultural (7S) puede mejorarse de dos maneras identificadas hasta el momento. En primer lugar, mediante la incorporación de subcriterios que consideren distintos tipos de importancia cultural de las especies presentes en el sistema. Por ejemplo, se podría distinguir si una especie es relevante a nivel local, si forma parte de la identidad cultural nacional, o si se encuentra en alguna categoría de riesgo, como en peligro de extinción o en situación vulnerable. Estas perspectivas permitirían una valoración más integral. Una segunda propuesta complementaria consiste en generar categorías que permitan aplicar otro tipo de función de preferencia, lo que ofrecería mayor precisión al análisis. Esta mejora sería particularmente útil en el caso del método PROMETHEE, que admite funciones de preferencia ajustables.

Para el indicador 8A, relacionado con la existencia de prácticas de conservación del suelo y el agua, se propone una mejora similar a la planteada para el indicador anterior, mediante la incorporación de categorías adicionales y la diferenciación de los tipos de prácticas implementadas a través de subcriterios. Esta desagregación permitiría una evaluación más detallada del manejo del recurso suelo y agua en los sistemas analizados.

En cuanto a la captura de CO₂ equivalente (9A), también se sugiere su desagregación en subcriterios, con el fin de distinguir entre la contribución de las hileras de frutales o especies perennes propias del modelo MIAF y la de los árboles o especies perennes que ya existían previamente dentro de cada módulo, en los linderos, o que se integran mediante otras prácticas de manejo. Esta diferenciación permitiría una estimación más precisa del potencial de captura de carbono del sistema.

Finalmente, el indicador relacionado con el uso de pesticidas (10A) podría mejorarse en términos de precisión si se refiriera explícitamente a la cantidad de insumos aplicados en el sistema de producción asociando ese dato con lo recomendado, incluso con la fase fenológica del cultivo. Además, sería posible clasificar dicha cantidad en categorías para incorporar una función de preferencia más adecuada en el caso del método PROMETHEE.

En cuanto al uso de maquinaria y equipo, se decidió no incluir un indicador específico debido a la naturaleza predominantemente manual de las técnicas utilizadas en los sistemas analizados. Sin embargo, en sistemas con prácticas de producción más tecnificadas, sería necesario incorporar un subcriterio relacionado con este aspecto y ajustar la ponderación de los indicadores en consecuencia.

Como se detalló previamente en la descripción de los sistemas, esta metodología se aplicó en sistemas MIAF que difieren de los modelos más difundidos a nivel nacional, así como a otros tipos de sistemas agroforestales. Aunque esta diversidad permitió contar con un abanico amplio de datos, se considera que, en etapas más avanzadas, el análisis —y en particular el establecimiento del ranking— debería realizarse entre sistemas ubicados en ecosistemas comparables y con edades de establecimiento similares.

Los distintos ejercicios descritos a lo largo del documento evidencian la flexibilidad de los MCDA para evaluar y cuantificar la MF tanto del sistema MIAF como de otros sistemas de producción. Esta flexibilidad es válida siempre que se definan claramente los objetivos de la evaluación dentro de un marco metodológico bien fundamentado, como se expuso en los apartados iniciales de este trabajo.

6.6. Conclusiones

Las herramientas de análisis multicriterio para la toma de decisiones demostraron ser útiles para integrar múltiples dimensiones del sistema MIAF y abordar su evaluación de forma robusta e integral. La metodología desarrollada permite

vincular los objetivos del sistema con indicadores cuantitativos y cualitativos, tanto sociales como ambientales, bajo diferentes esquemas de ponderación, lo que facilita un análisis flexible y contextualizado de su multifuncionalidad. Esta propuesta representa una aportación metodológica a las opciones de evaluación integral de agroecosistemas complejos, como el MIAF, al ofrecer un marco estructurado y adaptable para analizar su capacidad de proveer simultáneamente diversos servicios ecosistémicos.

La aplicación práctica de la metodología, utilizando información empírica de sistemas MIAF y agroforestales circundantes, permitió demostrar su operatividad y sensibilidad ante distintos escenarios de ponderación de indicadores. Este ejercicio reveló variaciones en el posicionamiento de los sistemas evaluados según la distribución de pesos, y permitió identificar criterios con mayor influencia en los resultados. Asimismo, se detectaron áreas de mejora metodológica, como la posibilidad de desagregar indicadores, incorporar subcriterios y ajustar funciones de preferencia, especialmente en métodos como PROMETHEE. Estos hallazgos no solo validan el potencial de la herramienta desarrollada, sino que también ofrecen recomendaciones concretas para fortalecer futuras evaluaciones de la multifuncionalidad en contextos sociales y ambientales diversos.

6.7. Literatura citada

- Alinezhad, A., & Khalili, J. (2019). New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM) (Vol. 277). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15009-9>
- Andrade, H. J., Segura, M., Somarriba, E., & Villalobos, M. (2008). Valoración biofísica y financiera de la fijación de carbono por uso del suelo en fincas cacaoteras indígenas de Talamanca, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 46, 45–50.
- Andrich, D., & Marais, I. (2019). The Idea of Measurement. In D. Andrich & I. Marais (Eds.), *A course in rasch measurement theory: Measuring in the educational, social and health sciences* (pp. 3–11). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7496-8_1
- Arriaga-Vázquez, A. M., Martínez-Menez, M. R., Rubiños-Panta, J. E., Fernández-Reynoso, D. S., Delgadillo-Martínez, J., & Vázquez-Alarcón, A. (2020). Propiedades químicas y biológicas de los suelos en milpa

- intercalada con árboles frutales. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(3), 465–474. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.599>
- Benavides Solorio, J. de D., Torres García, O., Flores Garnica, J. G., Acosta Mireles, M., & Rueda Sánchez, A. (2021). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono aéreos de *Cedrela odorata* L. en plantaciones forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(65), 89–111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i65.791>
- Cadena-Iñiguez, P., Camas-Gómez, R., López-Báez, W., López-Gómez, H. del C., & González-Cifuentes, J. H. (2018). El MIAF, una alternativa viable para laderas en áreas marginadas del sureste de México: caso de estudio en Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(7), 1351–1361. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.1670>
- Cicciù, B., Schramm, F., & Batista Schramm, V. (2022). Multi-criteria decision making/aid methods for assessing agricultural sustainability: A literature review. *Environmental Science & Policy*, 138, 85–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.09.020>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2013). Manual para el Diseño y la Construcción de Indicadores. Instrumentos principales para el monitoreo de programas sociales de México.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- de Oliveira, M. S., Steffen, V., de Francisco, A. C., & Trojan, F. (2023). Integrated data envelopment analysis, multi-criteria decision making, and cluster analysis methods: Trends and perspectives. *Decision Analytics Journal*, 8, Article 100271. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100271>
- Demircioğlu, M. E., & Ulukan, H. Z. (2019). A novel hybrid approach based on intuitionistic fuzzy multi criteria group-decision making for environmental pollution problem. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(1), 1013–1025. <https://doi.org/10.3233/JIFS-179465>
- Douterlungne, D., Herrera-Gorocica, A. M., Ferguson, B. G., Siddique, I., & Soto-Pinto, L. (2013). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia*, 47(4), 385–397.
- Fonseca Sánchez, A. C. (2022). Análisis del Programa Sembrando Vida desde el enfoque de política pública. *Quórum Legislativo*, 139, 179–221. <https://unctad.org/system/files/official-document/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Jonotla Puebla. <http://mapserver.inegi.org.mx/mg>
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis (First)*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118644898>
- Kuyah, S., Muthuri, C., Wakaba, D., Cyamweshi, A. R., Kiprotich, P., & Mukuralinda, A. (2024). Allometric equations and carbon sequestration potential of mango (*Mangifera indica*) and avocado (*Persea americana*) in

- Kenya. *Trees, Forests and People*, 15, Article 100467. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100467>
- Melo, L. C. de, Sanquetta, C. R., Corte, A. P. D., & Mognon, F. (2015). Methodological alternatives in the estimate of biomass for young individuals of *Bambusa* spp. *Bioscience Journal*, 31(3), 791–800. <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n3a2015-26098>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Opportunities and challenges for business and industry. <https://www.millenniumassessment.org/en/index.html>
- Ordoñez-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. *Revista Campo-Território*, 17(48), 109–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.14393/RCT174867657>
- 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), Artículo e221247. <https://doi.org/10.24836/es.v32i60.1247>
- Ramírez-Maces, H. O., Tadeo-Robledo, M., Villegas-Aparicio, Y., Aragón-Cuevas, F., Martínez-Gutiérrez, A., Rodríguez-Ortiz, G., Carrillo-Rodríguez, J. C., Espinosa-Calderón, A., & De la O Olán, M. (2023). Diversidad biológica del sistema milpa y su papel en la seguridad alimentaria en la Sierra Mixe, Oaxaca. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46(2), 105–113. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.105>
- Rueda Sánchez, A., Gallegos Rodríguez, A., González Eguiarte, D., Ruiz Corral, J. A., Benavides Solorio, J. de D., López Alcocer, E., & Mireles, M. A. (2018). Estimación de biomasa aérea en plantaciones de *Cedrela odorata* L. y *Swietenia macrophylla* King. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 8–17. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i25.300>
- Schroth, G., D'Angelo, S. A., Geraldtes Teixeira, W., Haag, D., & Lieberei, R. (2002). Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 163, 131–150.
- Shih, H.-S. (2021). Threshold-enhanced PROMETHEE Group Decision Support under uncertainties. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021(1), Article 5594074. <https://doi.org/10.1155/2021/5594074>
- Tapia-Hernández, A., Aldasoro-Maya, E. M., & Rodríguez-Robles, U. (2021). De sotocultivos para el sistema MIAF al diálogo de saberes en una comunidad mazahua: una travesía transdisciplinaria. *Nova Scientia*, 13(3), 1–38. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2831>
- Tapia-Hernández, A., Aldasoro-Maya, M. E., Rodríguez-Robles, U., Martínez-Zurimendi, P., & Rosset, P. (2024). Milpa intercalada con árboles frutales: revisión y estudio de caso en el Cañón del Usumacinta, Tabasco, México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 21(2), 168–185. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i2.1580>

- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., Espinosa Calderón, A., Hernández Romero, E., Camas Gómez, R., Torres Zambrano, J. P., & Zambada Martínez, 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.
- Zetina-Lezama, R., Uribe-Gómez, S., Capetillo-Burela, Á., Francisco-Nicolás, N., Hernández-Estrada, C. A., & Reynolds-Chávez, M. A. (2023). Descriptive study of the capacity of six hillside soil management systems in the control of surface runoff. *Agrociencia*, 57(1), 150-176. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i1.2408>

2. APÉNDICES

Apéndice 1. Ecuaciones alométricas para estimar la captura de CO₂ eq.

Especie	Ecuación alométrica	Referencia
<i>Bambusa oldhamii</i>	$\beta_0 + (\beta_1 \cdot DN^{0.5}) \cdot \ln DN$	Melo et al. (2015)
<i>Cedrela odorata</i>	$0.00341 \cdot DN^{3.38248}$	Benavides Solorio et al. (2021)
<i>Citrus</i> spp.	$6.64 + 0.279(AB) + 0.000514(AB^2)$	Schroth et al. (2002)
Especies de frutales	$10(-1,11 + 2,64 \cdot \log(DN))$	Andrade et al. (2008)
Especies del trópico húmedo	$21,30 - 6,95 \cdot DN + 0,74 \cdot DN^2$	Andrade et al. (2008)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	$\alpha + \beta_1 \ln(DN)$	Douterlungne et al. (2013)
<i>Persea americana</i>	$0.0638 \times DN^{2.5435}$	Kuyah et al. (2024)
<i>Swietenia macrophylla</i>	$0.6603 DN^2 - 8.2725 DN + 35.535$	Rueda Sánchez et al. (2018)

DN: diámetro normal; AB: área basal.

Apéndice 2. Clasificación, puntuación total y para cada criterio de los sistemas analizados con el método TOPSIS.

wi	Sistema	Criterio										Yi	Orden
		1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8A	9A	10A		
wi 10% cada criterio	Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.000	0.100	0.100	0.079	0.100	0.398	8
	Coyol	0.016	0.000	0.008	0.090	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000	0.100	0.315	9
	Poc1	0.087	0.063	0.016	0.098	0.002	0.100	0.100	0.100	0.070	0.000	0.636	2
	Bal2	0.029	0.100	0.044	0.099	0.100	0.050	0.100	0.100	0.100	0.000	0.721	1
	Poc2	0.082	0.084	0.100	0.100	0.017	0.050	0.100	0.000	0.044	0.000	0.576	3
	Tec1	0.100	0.058	0.078	0.100	0.018	0.050	0.100	0.000	0.060	0.000	0.564	4
	Tec2	0.071	0.021	0.055	0.099	0.007	0.050	0.100	0.100	0.058	0.000	0.562	5
	Tec3	0.059	0.042	0.078	0.100	0.025	0.050	0.100	0.000	0.029	0.000	0.482	7
	Tec4	0.029	0.058	0.050	0.100	0.004	0.050	0.100	0.000	0.015	0.100	0.506	6
wi 50%S 50%A	Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.070	0.170	0.134	0.160	0.547	4
	Coyol	0.013	0.000	0.005	0.063	0.000	0.000	0.000	0.170	0.000	0.160	0.412	8
	Poc1	0.069	0.044	0.011	0.068	0.002	0.070	0.070	0.170	0.118	0.000	0.623	2
	Bal2	0.023	0.070	0.031	0.069	0.070	0.035	0.070	0.170	0.170	0.000	0.708	1
	Poc2	0.066	0.059	0.070	0.070	0.012	0.035	0.070	0.000	0.075	0.000	0.456	7
	Tec1	0.080	0.041	0.054	0.070	0.013	0.035	0.070	0.000	0.103	0.000	0.465	5
	Tec2	0.057	0.015	0.039	0.069	0.005	0.035	0.070	0.170	0.099	0.000	0.559	3
	Tec3	0.047	0.029	0.054	0.070	0.017	0.035	0.070	0.000	0.049	0.000	0.372	9
	Tec4	0.024	0.041	0.035	0.070	0.002	0.035	0.070	0.000	0.026	0.160	0.462	6
wi 60%S 40%A	Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.090	0.130	0.110	0.130	0.476	7
	Coyol	0.015	0.000	0.007	0.081	0.000	0.000	0.000	0.130	0.000	0.130	0.363	9
	Poc1	0.078	0.051	0.015	0.088	0.002	0.080	0.090	0.130	0.097	0.000	0.630	2

wi 40%S 60%A	Bal2	0.026	0.080	0.039	0.089	0.080	0.040	0.090	0.130	0.140	0.000	0.714	1
	Poc2	0.074	0.067	0.090	0.090	0.013	0.040	0.090	0.000	0.061	0.000	0.526	4
	Tec1	0.090	0.046	0.070	0.090	0.014	0.040	0.090	0.000	0.085	0.000	0.525	5
	Tec2	0.064	0.017	0.050	0.089	0.005	0.040	0.090	0.130	0.082	0.000	0.567	3
	Tec3	0.053	0.034	0.070	0.090	0.020	0.040	0.090	0.000	0.040	0.000	0.437	8
	Tec4	0.027	0.046	0.045	0.090	0.003	0.040	0.090	0.000	0.021	0.130	0.492	6
	Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.060	0.200	0.157	0.200	0.627	2
	Coyol	0.011	0.000	0.005	0.054	0.000	0.000	0.000	0.200	0.000	0.200	0.470	5
	Poc1	0.061	0.032	0.010	0.059	0.001	0.050	0.060	0.200	0.139	0.000	0.611	3
	Bal2	0.020	0.050	0.026	0.059	0.050	0.025	0.060	0.200	0.200	0.000	0.691	1
	Poc2	0.057	0.042	0.060	0.060	0.008	0.025	0.060	0.000	0.088	0.000	0.400	8
	Tec1	0.070	0.029	0.047	0.060	0.009	0.025	0.060	0.000	0.121	0.000	0.420	7
	Tec2	0.050	0.011	0.033	0.060	0.003	0.025	0.060	0.200	0.117	0.000	0.558	4
	Tec3	0.041	0.021	0.047	0.060	0.012	0.025	0.060	0.000	0.057	0.000	0.323	9
	Tec4	0.021	0.029	0.030	0.060	0.002	0.025	0.060	0.000	0.030	0.200	0.457	6

Apéndice 3. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 10% para cada criterio.

Sistema	Criterio										ϕ^+
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012	0.000	0.013	0.050	0.062	0.075	0.211
Coyol	0.006	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.050	0.000	0.075	0.143
Poc1	0.068	0.044	0.005	0.025	0.000	0.100	0.013	0.050	0.048	0.000	0.352
Bal2	0.015	0.091	0.037	0.029	0.100	0.025	0.013	0.050	0.095	0.000	0.454
Poc2	0.063	0.075	0.093	0.033	0.006	0.025	0.013	0.000	0.028	0.000	0.334
Tec1	0.086	0.041	0.071	0.036	0.008	0.025	0.013	0.000	0.042	0.000	0.321
Tec2	0.052	0.013	0.039	0.030	0.000	0.025	0.013	0.050	0.040	0.000	0.262
Tec3	0.050	0.031	0.071	0.033	0.027	0.025	0.013	0.000	0.014	0.000	0.264
Tec4	0.016	0.041	0.038	0.035	0.000	0.025	0.013	0.000	0.003	0.075	0.244

Apéndice 4. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 10% para cada criterio.

Sistema	Criterio										ϕ^-
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.093	0.081	0.080	0.100	0.013	0.088	0.000	0.000	0.007	0.000	0.461
Coyol	0.069	0.081	0.075	0.088	0.034	0.088	0.100	0.000	0.090	0.000	0.624
Poc1	0.004	0.019	0.075	0.043	0.027	0.000	0.000	0.000	0.013	0.038	0.217
Bal2	0.063	0.000	0.039	0.002	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.038	0.154
Poc2	0.007	0.003	0.000	0.000	0.013	0.013	0.000	0.063	0.042	0.038	0.177
Tec1	0.000	0.022	0.009	0.000	0.013	0.013	0.000	0.063	0.018	0.038	0.173
Tec2	0.020	0.069	0.030	0.000	0.017	0.013	0.000	0.000	0.020	0.038	0.206

Tec3	0.038	0.038	0.009	0.000	0.013	0.013	0.000	0.063	0.066	0.038	0.275
Tec4	0.063	0.022	0.038	0.000	0.024	0.013	0.000	0.063	0.076	0.000	0.297

Apéndice 5. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 50%S-50%A.

Sistema	Criterio										φ^+
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.000	0.009	0.085	0.105	0.120	0.327
Coyol	0.005	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.085	0.000	0.120	0.219
Poc1	0.055	0.031	0.003	0.018	0.000	0.070	0.009	0.085	0.082	0.000	0.351
Bal2	0.012	0.063	0.026	0.020	0.070	0.018	0.009	0.085	0.161	0.000	0.464
Poc2	0.050	0.053	0.065	0.023	0.004	0.018	0.009	0.000	0.047	0.000	0.268
Tec1	0.069	0.028	0.050	0.025	0.006	0.018	0.009	0.000	0.071	0.000	0.275
Tec2	0.042	0.009	0.027	0.021	0.000	0.018	0.009	0.085	0.068	0.000	0.279
Tec3	0.040	0.022	0.050	0.023	0.019	0.018	0.009	0.000	0.023	0.000	0.203
Tec4	0.013	0.028	0.026	0.024	0.000	0.018	0.009	0.000	0.006	0.120	0.243

Apéndice 6. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 50%S-50%A.

Sistema	Criterio										φ^-
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.075	0.057	0.056	0.070	0.009	0.061	0.000	0.000	0.012	0.000	0.339
Coyol	0.055	0.057	0.053	0.061	0.024	0.061	0.070	0.000	0.153	0.000	0.534
Poc1	0.003	0.013	0.052	0.030	0.019	0.000	0.000	0.000	0.021	0.060	0.199
Bal2	0.050	0.000	0.027	0.001	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.060	0.148
Poc2	0.006	0.002	0.000	0.000	0.009	0.009	0.000	0.106	0.071	0.060	0.263
Tec1	0.000	0.015	0.006	0.000	0.009	0.009	0.000	0.106	0.030	0.060	0.235
Tec2	0.016	0.048	0.021	0.000	0.012	0.009	0.000	0.000	0.033	0.060	0.200
Tec3	0.031	0.026	0.006	0.000	0.009	0.009	0.000	0.106	0.112	0.060	0.359
Tec4	0.050	0.015	0.026	0.000	0.017	0.009	0.000	0.106	0.130	0.000	0.353

Apéndice 7. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 60%S-40%A.

Sistema	Criterio										φ^+
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.011	0.065	0.086	0.098	0.270
Coyol	0.005	0.000	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.065	0.000	0.098	0.179
Poc1	0.061	0.035	0.004	0.023	0.000	0.080	0.011	0.065	0.067	0.000	0.347
Bal2	0.014	0.073	0.033	0.026	0.080	0.020	0.011	0.065	0.132	0.000	0.454
Poc2	0.056	0.060	0.083	0.030	0.004	0.020	0.011	0.000	0.039	0.000	0.304
Tec1	0.077	0.033	0.064	0.032	0.007	0.020	0.011	0.000	0.058	0.000	0.302

Tec2	0.047	0.010	0.035	0.027	0.000	0.020	0.011	0.065	0.056	0.000	0.272
Tec3	0.045	0.025	0.064	0.029	0.022	0.020	0.011	0.000	0.019	0.000	0.236
Tec4	0.014	0.033	0.034	0.031	0.000	0.020	0.011	0.000	0.005	0.098	0.245

Apéndice 8. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 60%S-40%A.

Sistema	Criterio										φ-
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.084	0.065	0.072	0.090	0.010	0.070	0.000	0.000	0.010	0.000	0.401
Coyol	0.062	0.065	0.068	0.079	0.027	0.070	0.090	0.000	0.126	0.000	0.586
Poc1	0.003	0.015	0.067	0.038	0.022	0.000	0.000	0.000	0.018	0.049	0.212
Bal2	0.056	0.000	0.035	0.002	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.049	0.152
Poc2	0.007	0.003	0.000	0.000	0.010	0.010	0.000	0.081	0.058	0.049	0.217
Tec1	0.000	0.018	0.008	0.000	0.010	0.010	0.000	0.081	0.025	0.049	0.200
Tec2	0.018	0.055	0.027	0.000	0.014	0.010	0.000	0.000	0.028	0.049	0.201
Tec3	0.034	0.030	0.008	0.000	0.010	0.010	0.000	0.081	0.092	0.049	0.314
Tec4	0.056	0.018	0.034	0.000	0.019	0.010	0.000	0.081	0.107	0.000	0.325

Apéndice 9. Flujo positivo para cada criterio de cada sistema, escenario 40%S-60%A.

Sistema	Criterio										φ+
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.008	0.100	0.123	0.150	0.387
Coyol	0.004	0.000	0.000	0.008	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000	0.150	0.262
Poc1	0.048	0.022	0.003	0.015	0.000	0.050	0.008	0.100	0.096	0.000	0.341
Bal2	0.011	0.045	0.022	0.017	0.050	0.013	0.008	0.100	0.189	0.000	0.455
Poc2	0.044	0.038	0.056	0.020	0.003	0.013	0.008	0.000	0.055	0.000	0.235
Tec1	0.060	0.020	0.043	0.022	0.004	0.013	0.008	0.000	0.083	0.000	0.252
Tec2	0.037	0.006	0.024	0.018	0.000	0.013	0.008	0.100	0.081	0.000	0.285
Tec3	0.035	0.016	0.043	0.020	0.014	0.013	0.008	0.000	0.027	0.000	0.174
Tec4	0.011	0.020	0.023	0.021	0.000	0.013	0.008	0.000	0.007	0.150	0.251

Apéndice 10. Flujo negativo para cada criterio de cada sistema, escenario 40%S-60%A.

Sistema	Criterio										φ-
	1S	2S	3S	4S	5S	6S	7S	8C	9A	10A	
Bal1	0.065	0.041	0.048	0.060	0.006	0.044	0.000	0.000	0.014	0.000	0.278
Coyol	0.048	0.041	0.045	0.053	0.017	0.044	0.060	0.000	0.180	0.000	0.487
Poc1	0.003	0.009	0.045	0.026	0.014	0.000	0.000	0.000	0.025	0.075	0.196
Bal2	0.044	0.000	0.024	0.001	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.075	0.150
Poc2	0.005	0.002	0.000	0.000	0.006	0.006	0.000	0.125	0.083	0.075	0.303

Tec1	0.000	0.011	0.005	0.000	0.006	0.006	0.000	0.125	0.035	0.075	0.264
Tec2	0.014	0.034	0.018	0.000	0.009	0.006	0.000	0.000	0.039	0.075	0.196
Tec3	0.027	0.019	0.005	0.000	0.006	0.006	0.000	0.125	0.132	0.075	0.395
Tec4	0.044	0.011	0.023	0.000	0.012	0.006	0.000	0.125	0.153	0.000	0.373