

Análisis comparativo del impacto en los suelos agrícolas: agricultura sintrópica frente la agricultura convencional

Comparative analysis of agricultural soils impacts: Syntropic agriculture versus conventional farming

Anghie Liseth Jurado Campos¹, María Clara Zuluaga²

¹Estudiante de Maestría en Ciencias – Geomorfología y suelos, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. ²Docente de la Escuela de Geociencias de la Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

ajuradoc@unal.edu.co

Resumen

El suelo desempeña un papel fundamental en la agricultura, proporcionando nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Esta investigación tiene como objetivo comparar la agricultura sintrópica, un modelo agroforestal enfocado en la regeneración del suelo y la biodiversidad, con la agricultura convencional, caracterizada por el uso de agroquímicos y monocultivos, lo que conlleva riesgos como la erosión y contaminación. En Colombia, la falta de estudios sobre los impactos de estos enfoques limita la adopción de prácticas agrícolas sostenibles. Este análisis, basado en una revisión de 65 documentos, evalúa aspectos como la rentabilidad, las funciones ambientales, la restauración de áreas degradadas y la salud del suelo. Si bien la agricultura convencional proporciona mayores rendimientos a corto plazo, puede degradar el suelo con el tiempo. En contraste, la agricultura sintrópica favorece la regeneración del suelo y ofrece beneficios ambientales a largo plazo, aunque requiere una inversión inicial mayor y enfrenta desafíos en su implementación.

Palabras clave: agroforestería, impacto ambiental, monocultivos, sostenibilidad agrícola.

Abstract

Soil plays a fundamental role in agriculture, providing essential nutrients for plant growth. This research aims to compare syntropic agriculture, an agroforestry model focused on soil regeneration and biodiversity, with conventional agriculture, characterized by the use of agrochemicals and monocultures, which carry risks such as erosion and pollution. In Colombia, the lack of studies on the impacts of these approaches limits the adoption of sustainable agricultural practices. This analysis, based on a review of 65 documents, evaluates aspects such as profitability, environmental functions, degraded land restoration, and soil health. While conventional agriculture provides higher short-term yields, it can degrade the soil over time. In contrast, syntropic agriculture favors soil regeneration and offers long-term environmental benefits, although it requires higher initial investment and faces implementation challenges.

Keywords: agroforestry, environmental impact, monocultures, agricultural sustainability.

Introducción

La agricultura es el sistema de producción de alimentos más importante y esencial para la vida humana, desempeñando un papel clave en seguridad alimentaria, la salud pública, la conservación del agua y la sostenibilidad de los recursos naturales (Sarandón, 2020; FAO, 2015; Calderón-Medina et al., 2018). Sin embargo, esta actividad enfrenta retos significativos como el cambio climático, la degradación de los suelos y la creciente demanda de alimentos. Además, es una de las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo con aproximadamente el 20% de las emisiones globales (Smith y Siciliano, 2015; Ha, 2023; FAO, 2019). Estas problemáticas subrayan la necesidad de transitar hacia sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes.

La agricultura convencional ha dominado la producción mundial de alimentos debido a su eficiencia en la maximización del rendimiento mediante el uso de insumos químicos, monocultivos y maquinaria pesada (De Marco y Kunin, 2022). No obstante, este modelo ha generado efectos adversos significativos en la calidad del suelo, como la pérdida de fertilidad, la erosión y la disminución de la biodiversidad. Tales impactos comprometen la sostenibilidad de los ecosistemas y la seguridad alimentaria a largo plazo (eg: Smith y Siciliano, 2015; Qiao et al., 2024; Peng et al., 2022; Hameed Ologunde et al., 2024).

En contraste, la agricultura sintrópica ha surgido como una alternativa prometedora basada en la regeneración del suelo y la integración de principios agroforestales. Este enfoque, desarrollado por Ernst Götsch en la década de 1980, imita los procesos naturales de sucesión ecológica y biodiversidad, promoviendo la producción de alimentos en armonía con el entorno (González, 2023; Gietzen, 2020). La agricultura sintrópica ha demostrado ser eficaz para mejorar la salud del suelo, reducir los impactos ambientales y enfrentar el desafío de alimentar a una población mundial en

crecimiento (eg: Casas Pardo, 2023; Nepal et al., 2024; Tavarez y Miguel, 2014).

Comparar la agricultura convencional y la agricultura sintrópica es fundamental para evaluar sus efectos a largo plazo de ambos modelos, sobre la calidad del suelo y la sostenibilidad ambiental. La agricultura convencional prioriza la producción intensiva y la sintrópica busca equilibrar la producción con la regeneración de ecosistemas. Este contraste plantea preguntas clave: ¿Cuáles son las ventajas y limitaciones de cada modelo? ¿Cuál ofrece un mejor balance entre productividad y sostenibilidad?

El presente trabajo aborda estas preguntas mediante una revisión de la literatura reciente, analizando los impactos de ambos sistemas en términos de calidad del suelo, productividad agrícola, sostenibilidad ambiental y factores socioeconómicos. A partir de una selección de 65 estudios publicados en la última década, se busca proporcionar una perspectiva integral que facilite la adopción de políticas y prácticas agrícolas más sostenibles. Este análisis busca contribuir al conocimiento científico y orientar la toma de decisiones para mitigar los desafíos ambientales y socioeconómicos asociados con la agricultura moderna.

Metodología de revisión

La revisión de literatura se basó en una búsqueda de artículos publicados en libros, revistas científicas y sitios web especializados sobre agricultura sintrópica y convencional en los últimos diez años. Se seleccionan aproximadamente 65 documentos, incluyendo estudios de campo de diferentes países con características agroecológicas similares, donde ambas prácticas agrícolas han sido implementadas, estudiadas o promovidas recientemente (Castillo, 2022; Chalán, 2019; Matsumura, 2016).

Para llevar a cabo la búsqueda bibliográfica, se emplearon palabras clave como "agricultura

sintrópica", "agricultura convencional" y "propiedades del suelo" en bases de datos como PubMed, Web of Science, Scopus y Google Scholar. Se establecieron criterios de inclusión y exclusión basados en el idioma (español, inglés, y portugués), el diseño del estudio (experimental, observacional y de revisión) y la relevancia para los objetivos de la revisión (Figura 1).

Los criterios de inclusión para la selección de estudios en esta revisión fueron: (1) publicaciones en español, inglés y portugués en revistas científicas indexadas; (2) comparaciones directas entre la agricultura sintrópica y la convencional, en las siguientes variables evaluadas: prácticas agrícolas, rendimiento de cultivos, calidad del suelo, impacto ambiental y/o económico; (3) empleo de métodos rigurosos de investigación,

como ensayos controlados; y (4) presentación de datos cuantitativos y cualitativos para la comparación de ambos sistemas agrícolas.

Se excluyeron los estudios que no proporcionaban datos cuantitativos o cualitativos suficientes para un análisis comparativo riguroso. También se descartaron aquellos publicados en idiomas distintos a los mencionados anteriormente, debido a las limitaciones en el acceso a traducciones confiables y a la disponibilidad de una revisión detallada de contenido. Los estudios anteriores a 2010 fueron descartados, ya que no reflejan los avances recientes en agricultura sintrópica y convencional. Finalmente, se excluyeron aquellos cuya metodología no estuviera claramente especificada.

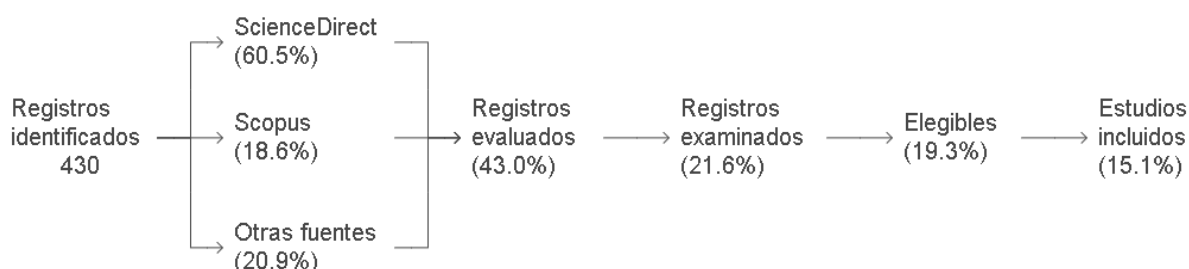


Figura 1. Diagrama de búsqueda de literatura que muestra los registros obtenidos en la revisión bibliográfica. Fuente: Autor.

Una vez recopilada la información, se realizó un análisis detallado para identificar y sintetizar los hallazgos clave sobre los efectos de la agricultura sintrópica y convencional en los suelos y la productividad agrícola. Este documento presenta los resultados de manera estructurada, utilizando tablas y figuras para facilitar la comparación y comprensión de los diferentes aspectos analizados. Además, se realizó una evaluación crítica de la calidad y validez de los estudios incluidos en la revisión, considerando criterios como el diseño del estudio, los métodos utilizados y la solidez de la interpretación de los resultados. A partir de esta revisión, se identificaron diversos estudios que comparan la agricultura sintrópica y

la convencional desde diferentes enfoques. En este sentido los estudios de Castillo, (2022), Chalán, (2019) y Matsumura, (2016) ofrecen perspectivas valiosas sobre la comparación entre la agricultura sintrópica y la convencional. Castillo, (2022) analizó la cobertura vegetal y el uso del suelo para identificar su potencial de captura de carbono. Chalán, (2019) examinó la relación entre el tipo de agricultura en el contexto del cambio climático. Por su parte, Matsumura, (2016) discutió la agricultura convencional y presentó la sintrópica como una alternativa, analizando su relación con la dimensión y su aplicación en la agricultura.

Revisión integral de la evidencia científica sobre los sistemas agrícolas Sintrópicos y Convencionales.

La agricultura convencional, se emplea en este artículo como referencia para comparar sus resultados con la agricultura sintrópica. En este contexto, los estudios incluidos de agricultura convencional se basan en el uso de agroquímicos, semillas híbridas, sistemas de

riego y maquinaria agrícola. Además, su característica principal, el monocultivo, que implica el uso extensivo de tierras para un solo tipo de cultivo aplicando métodos agrícolas uniformes en toda la plantación (FAO, 2023; Sumberg y Giller, 2022). Este enfoque, domina aproximadamente el 98.5% de las tierras agrícolas en algunos países del mundo (Clavijo, 2013; Diaz Mendoza, 2011; Rivera, 2019) (Figura 2).

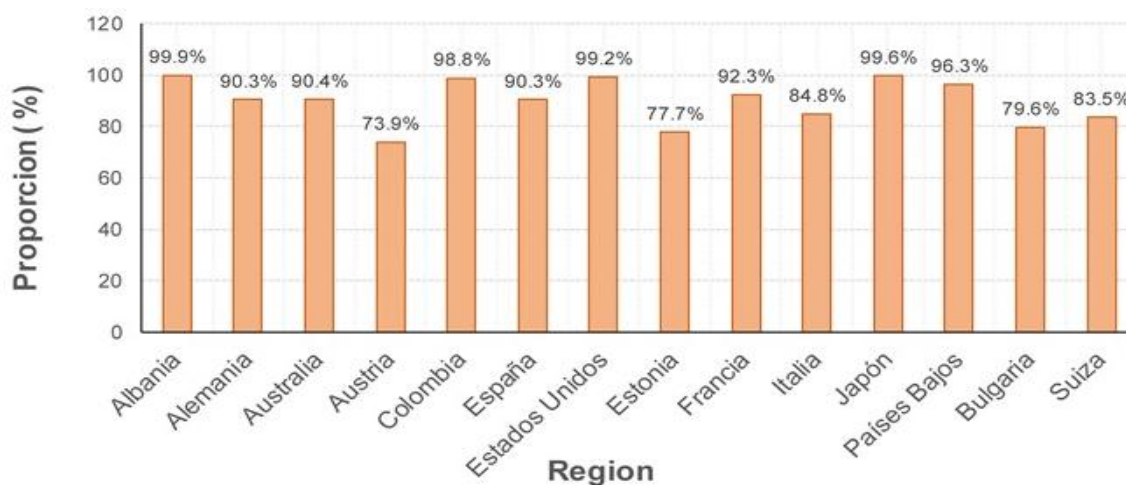


Figura 2. Proporción de suelos agrícolas con agricultura convencional en algunos países.

Fuente: adaptado de FAO (2023) y Sumberg y Giller (2022).

En contraste, la agricultura sintrópica, desarrollada por el agricultor suizo Ernst Götsch en 1982, ofrece una alternativa para cultivar productos comerciales y restaurar suelos degradados. Desde su inicio, este modelo se ha expandido en Brasil, implementándose en alrededor de 5000 predios familiares desde 1993, y se ha exportado a países como Bolivia, Chile, México, y varios países europeos, así como a China, Pakistán, India, Estados Unidos y Australia (Santos Rebello & Ghiringhello Sakamoto, 2021; Gatteli y Westphalen, 2022; Silva et al., 2017; Oliveira, 2023).

La característica distintiva de la agricultura sintrópica radica en su innovador método de siembra estratificada de cultivos. En este sistema las plantas pueden coexistir en diferentes niveles: el 20% de las plantas son árboles maderables (estrato emergente), que se destacan sobre el dosel forestal, mientras que el 40% son de porte alto (estrato dosel), el 60% de porte medio (estrato arbustivo) y el 80% de porte bajo (estrato herbáceo), ubicadas en la parte inferior de todos los demás estratos, aprovechando así una mayor sombra (Osorio y Yepes, 2018; Martinez Rodriguez et al., 2017) (Figura 3).



Figura 3. Siembra estratificada de cultivos en agricultura sintrópica. Fuente: adaptado de Osorio y Yepes (2018) y Martínez Rodríguez et al. (2017).

Otra característica importante en la agricultura sintrópica es la sucesión natural, la cual se divide en diferentes etapas que ocurren simultáneamente (Tabla 1). La primera fase se denomina "placenta", que es cuando la planta inicia su crecimiento y establece sus primeras raíces, aprovechando los nutrientes disponibles en el suelo. La siguiente se conoce como "secundaria", en esta fase, la planta desarrolla mayor biomasa, fortalece su estructura y comienza a interactuar con otras especies del ecosistema. La etapa final se llama "clímax", fase en la cual la planta alcanza su máximo desarrollo, estabiliza su crecimiento y contribuye a la

regeneración del suelo y la biodiversidad del sistema (Pelai et al., 2020; Sumberg y Giller, 2022).

Cada una de estas etapas contribuye a mejorar progresivamente el entorno de crecimiento, enriqueciendo el suelo y fomentando su fertilidad hasta alcanzar su máximo potencial. Por esta razón, al hablar de los estratos, es fundamental considerar las etapas de sucesión. En la fase de placenta, la vegetación herbácea domina el espacio, mientras que en las etapas secundaria y clímax, los árboles adquieren un papel predominante en la estructura del ecosistema (Andrade, 2019).

Tabla 1. Etapas de la agricultura sintrópica y algunos cultivos que se podrían implementar en Colombia.

Cultivos que se pueden implementar basados en siembra estratificada y tiempo				
Etapas de Sucesión				
	Placenta		Secundaria	Clímax
	< 2 años		2– 20 años	>20 años
Estratos				
Emergente	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Papaya (<i>Carica papaya</i>)	Eucalipto (<i>ucalyptus</i>)	Caucho (<i>Hevea brasiliensis</i>)
Alto	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)	Yuca (<i>Manihot esculenta</i>)	Mango (<i>Mangifera indica</i>)	Nuez de macadamia (<i>Macadamia integrifolia</i>)
Medio	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Ñame (<i>Dioscorea spp</i>)	Limón (<i>Citrus limon</i>)	Mandarina (<i>Citrus reticulata</i>)
Bajo	Calabaza (<i>Cucurbita</i>)	Piña (<i>Ananas Comosus L</i>)	Café (<i>Coffea arabica</i>)	Achiote (<i>Bixa Orellana</i>)

Fuente: adaptado de Pelai et al.,(2020) y Sumberg y Giller (2022).

Características generales de los estudios incluidos

En los últimos años, se ha observado un creciente interés y producción científica sobre agricultura sintrópica en numerosos países, sin embargo, en comparación con la agricultura convencional, el número de publicaciones sigue siendo menor (Pereira et al., 2024) (Figura 4). Este fenómeno ha sido impulsado por varios

factores, incluyendo cambios en las preferencias del consumidor hacia alimentos más saludables y sostenibles, preocupaciones ambientales sobre la aplicación de pesticidas y fertilizantes químicos en la agricultura convencional y la búsqueda de métodos agrícolas más resilientes y adaptativos frente al cambio climático (Laurance et al., 2014; Silva et al., 2017; Vermeulen et al., 2012).

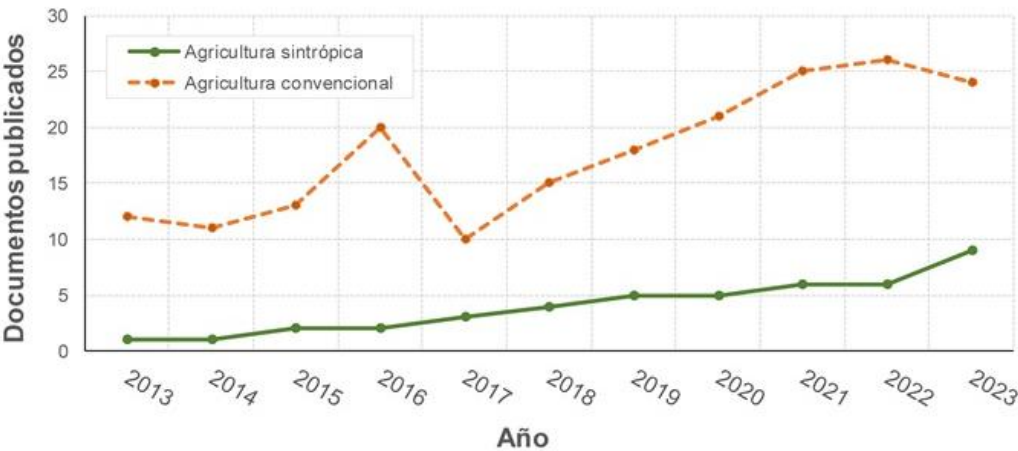


Figura 4. producción de literatura a través del tiempo sobre agricultura sintrópica y convencional. Fuente: adaptado de Scopus (2024).

Se identificaron 65 estudios publicados entre 2010 y 2023 que comparan la agricultura sintrópica, basada en procesos naturales, con la convencional, que usa agroquímicos y monocultivos (Castillo, 2022; Chalán, 2019; Matsumura, 2016). La mayoría adoptó un enfoque práctico, incluyendo ensayos de campo y estudios de caso, evaluando su impacto en la calidad del suelo, la biodiversidad, la viabilidad económica y la aceptación entre agricultores (Silva y Correa, 2009; Fallas et al., 2009).

De los 65 estudios analizados, 11 fueron de enfoque cuantitativo, destacando mejoras en la calidad del suelo en regiones como Nicaragua y Caquetá. Aunque los sistemas agrícolas convencionales demostraron una mayor productividad en países como Suecia y Costa Rica, los sistemas sintrópicos evidenciaron beneficios sostenibles en investigaciones realizadas en Estados Unidos y Brasil. La revisión también incluyó 15 estudios cualitativos, 10 revisiones, 5 investigaciones experimentales, 3 análisis de viabilidad económica y 2 estudios de

datos mixtos, reflejando una amplia diversidad metodológica.

Impacto en la calidad del suelo

En la literatura se han encontrado trabajos que analizan los efectos en la calidad de suelo de la agricultura sintrópica y convencional, a continuación, se compara mediante tres casos de estudio.

El uso intensivo de labranza, fertilizantes y pesticidas puede tener influencia en algunas propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, responsables de alrededor del 85% de sus funciones (Raimondi et al., 2023). El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Nicaragua evaluó, durante un período de tres años, el impacto en las propiedades físicas y la fertilidad del suelo de prácticas agrícolas convencionales basadas en tala y quema, fertilización química y monocultivos comparado con la agricultura sintrópica (Pavón et al., 2010) (Tabla 2).

Tabla 2. propiedades físicas y químicas de suelos con sistemas de uso sintrópico y convencional en Somotillo, Nicaragua.

Sistema de uso	D.R. (g.cm ⁻³)	D.A (g.cm ⁻³) 0-5 cm	M.O. (%)	Porosidad (%)	S. Compactación (%)
Agricultura sintrópica	2.6	1.1	3.7	11.7	86.7
Agricultura Convencional	2.6	1.1	2.9	13.4	88.3

D.A: densidad real; D.A: densidad aparente; M.O: materia orgánica; S. Compactación: susceptibilidad a la compactación.

Fuente: adaptado de Pavón et al. (2010).

Los resultados indican que ambos sistemas de manejo presentan valores similares de densidad real (2.6 g/cm³) y densidad aparente (1.1g/cm³), indicando que las características físicas del suelo no varían significativamente. Sin embargo, la materia orgánica es mayor en la agricultura sintrópica (3.7%) frente a la convencional (2.9%),

sugiriendo una mayor retención de nutrientes y agua, favoreciendo la estructura del suelo. La porosidad es menor en la sintrópica (11.7%) que en la convencional (13.4%), posiblemente por mayor acumulación de materia orgánica (Patiño et al., 2016). Además, la susceptibilidad a la compactación es menor en la agricultura

sintrópica, indicando que este enfoque podría reducir el riesgo de compactación y mejorar la sostenibilidad del suelo (Pavón et al., 2010).

En el departamento del Caquetá, Colombia, se realizó una evaluación de los efectos en los suelos de los sistemas agroforestales basados en los principios de la agricultura sintrópica, comparándolos con suelos cultivados bajo un sistema de agricultura convencional basado en monocultivo (Patiño et al., 2016). Los resultados muestran que ambos sistemas presentan valores

similares de densidad aparente y real en los horizontes A y B, lo que indica que la estructura del suelo no varía significativamente. Sin embargo, la agricultura sintrópica muestra una mayor porosidad en el horizonte B, menor resistencia a la penetración en ambos horizontes y una mayor humedad del suelo, lo que sugiere mejores condiciones para el desarrollo de las raíces y la retención de agua en comparación con la agricultura convencional (Atiqah et al., 2024; van den Bergh et al., 2024) (Tabla 3).

Tabla 3. Variables físicas del suelo en el departamento de Caquetá, Colombia, según horizonte y tipo de agricultura.

Parámetros	Agricultura sintrópica		Agricultura convencional	
	Horizonte A	Horizonte B	Horizonte A	Horizonte B
D.A (g.cm ⁻³)	1.3	1.4	1.3	1.4
D.R. (g.cm ⁻³)	2.4	2.7	2.5	2.6
Porosidad (%)	48.6	48.3	48.7	45.3
Penetrabilidad (MPa)	0.6	1.2	0.8	1.9
Profundidad (cm)	8.7	41.3	6.7	43.3
Humedad %	35.6	31.3	34.1	29.5
D.A: densidad aparente; D.R: densidad real.				

Fuente: adaptado de Patiño et al. (2016).

Así mismo, una investigación comparativa entre sistemas agrícolas convencionales y sistemas sintrópicos evaluó el incremento de materia orgánica del suelo durante un período de cinco años. Los suelos manejados bajo agricultura convencional mostraron un aumento moderado, pasando del 2.0% inicial al 2.5%, reflejando una mejora limitada en la regeneración del suelo. En contraste, los sistemas sintrópicos

experimentaron un incremento significativo, alcanzando hasta un 4.5% de materia orgánica en el mismo período (figura 5). Este aumento del 125% en los suelos sintrópicos resalta el impacto positivo de prácticas como la sucesión natural, la poda estratégica y el uso intensivo de biomasa, que promueven la regeneración ecológica y mejoran la fertilidad del suelo (Jose et al., 2007; Michelin, 2019; Sharry, Stevani, y Galarco, 2022)

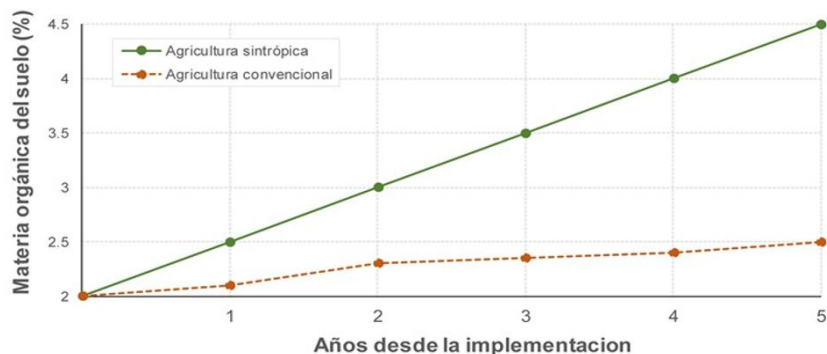


Figura 5. Incremento de la materia orgánica en el suelo. Fuente: adaptado de José et al. (2007), Michelon (2019), Sharry, Stevani, y Galarco (2022).

Productividad agrícola

El principal contraste entre la agricultura sintrópica y convencional en términos de productividad agrícola radica en los rendimientos. Los sistemas sintrópicos presentan hasta un 40% menos de producción en comparación con los convencionales (Castillo, 2022).

Esta diferencia se debe a que la agricultura sintrópica prioriza el uso de los recursos naturales sin emplear tecnologías para maximizar la productividad (Holzmueller, 2009). Además, estos sistemas son más susceptibles a malezas, plagas y enfermedades, lo que puede generar pérdidas y una mayor variabilidad en los rendimientos. La ausencia de agroquímicos y cultivos genéticamente modificados también limita la protección de las plantas frente a estos factores (Mandal et al., 2024; Otim et al., 2023).

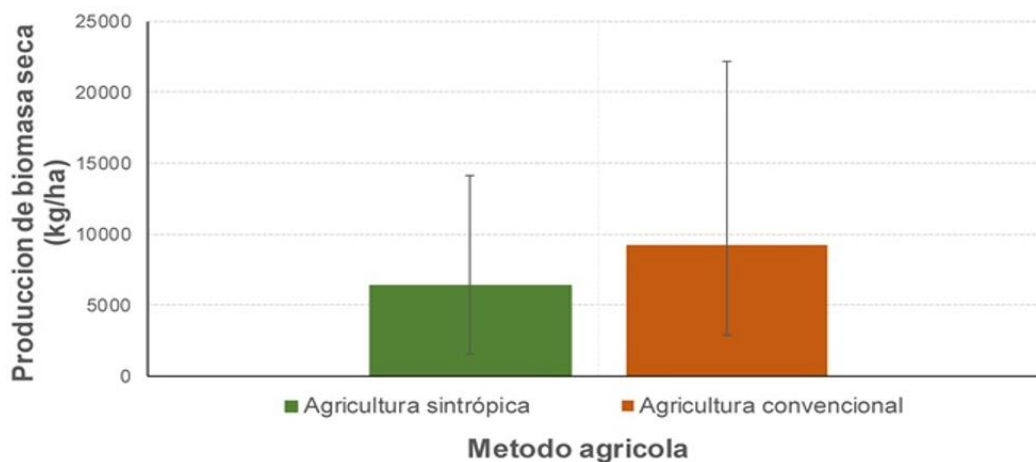


Figura 6. Comparación de rendimientos anuales de métodos agrícolas en Suecia. Fuente: adaptado de Connor, (2022).

La agricultura sintrópica, que emplea fertilización natural y regenerativa, tiende a presentar rendimientos inferiores a los métodos convencionales. Esto implica la necesidad de mayores extensiones de tierra para alcanzar niveles de producción similares (Dumont et al., 2020). Un estudio en Suecia evaluó los índices de rendimiento de ambos sistemas a escala regional, analizando la proporción de tierra utilizada y su contribución al suministro total de alimentos (figura 6). Se encontró que la producción anual promedio de biomasa seca, incluyendo residuos de cultivos, fue de 6 361 kg/ha en los sistemas sintrópicos, con un rango de 4 862 a 7 793 kg/ha. En contraste, los métodos convencionales, que emplean fertilizantes químicos y monocultivos, alcanzaron un promedio de 9223 kg/ha, con

valores que oscilaron entre 6337 y 12910 kg/ha (Connor, 2022).

Por otro lado, una investigación a largo plazo del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Turrialba, Costa Rica, comparó la producción de café con diversas variedades, en sistemas convencionales (monocultivo) y sintrópicos. Los resultados mostraron que, en sistemas sintrópicos, las variedades híbridas F1 Milenio, Centroamericano y Caturra alcanzaron rendimientos significativamente superiores a otras variedades, con promedios de 2842, 2673 y 1087 kg/ha, respectivamente. En comparación, la agricultura convencional reportó producciones promedio de 3062, 1712 y 1606 kg/ha para las mismas variedades (de Melo Virginio Filho et al., 2021) (figura 7).

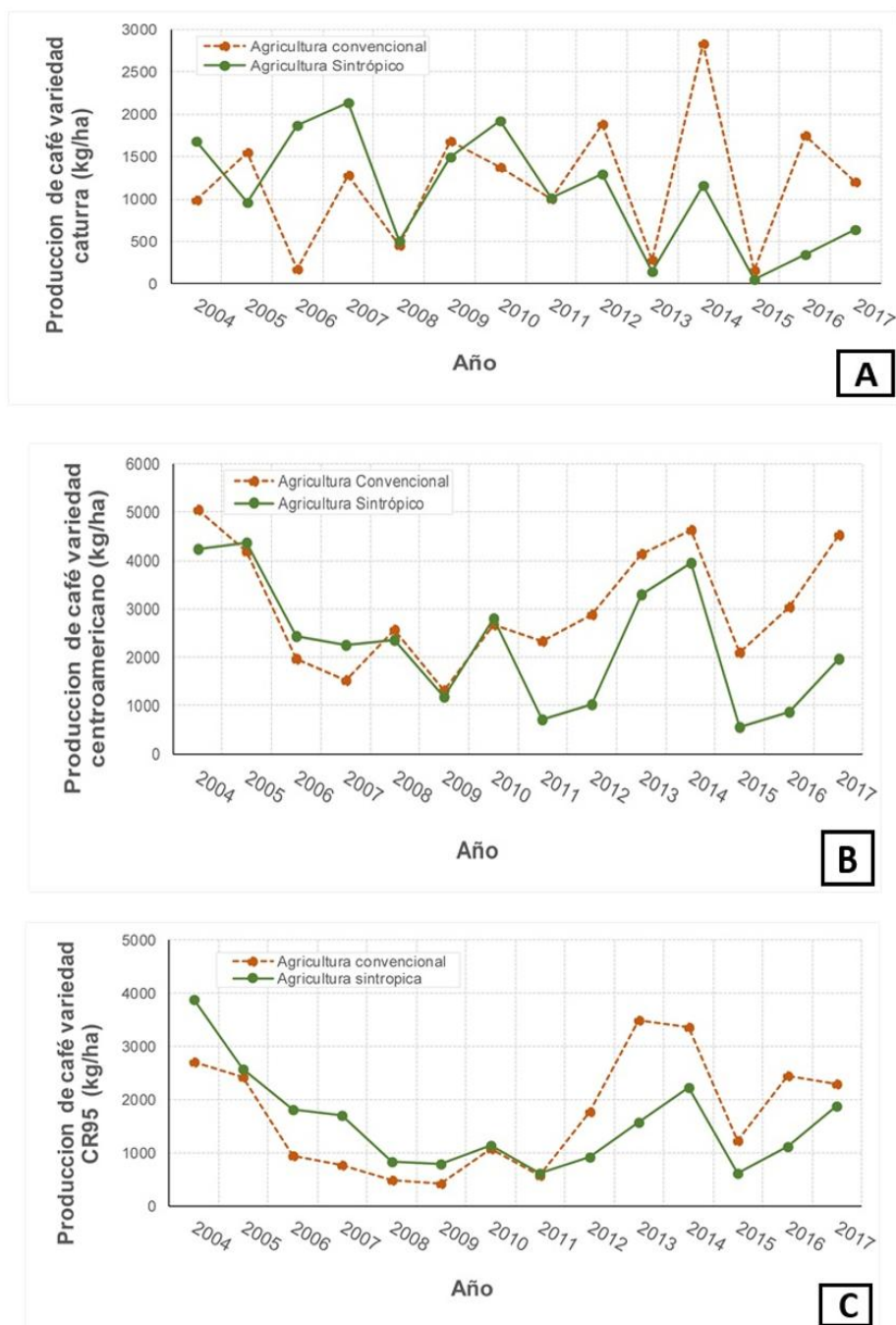


Figura 7. Producción de café durante 13 años en sistemas de agricultura sintrópica y convencional. **(A)** Producción de la variedad Caturra. **(B)** Producción de la variedad Centroamericano. **(C)** Producción de la variedad CR95. Fuente: adaptado de Melo Virginio Filho et al, (2021).

Estos hallazgos sugieren que, si bien la producción en la agricultura sintrópica suele ser menor que en la convencional, la combinación de variedades mejoradas con prácticas sintrópicas puede aumentar gradualmente los

rendimientos (de Melo Virginio Filho et al., 2021).

Sostenibilidad ambiental

La literatura destaca que la agricultura sintrópica se asemeja a los procesos naturales al promover una mayor diversidad de plantas en el sistema cultivado. Este enfoque genera una alta densidad vegetal en los estratos inferiores y una distribución más dispersa en los superiores (Gotsch, 2021; Andrade, 2019) (Figura 3). Este arreglo espacial contribuye a regular la temperatura del suelo, mantener la humedad y favorece la conservación del agua, fortaleciendo la sostenibilidad del ecosistema (Sánchez et al., 2022).

Los primeros estudios sobre agricultura sintrópica se realizaron en el noreste de Brasil, en suelos pobres en nutrientes previamente utilizados como pastizales (Martin et al., 2008). En una extensión de 80 ha, se implementó un cultivo de cacao bajo prácticas sintrópicas, transformando la zona en un productor exitoso de cacao orgánico. También se obtuvieron productos como mango, plátano, castaña, guayaba, aguacate, naranja y diversas frutas nativas y exóticas, sin necesidad de fertilizantes, riego, pesticidas o maquinaria pesada. Este enfoque sostenible promueve la autosuficiencia y la conservación de la biodiversidad (Pasini, 2015).

Otro ejemplo destacado de la implementación a gran escala de la agricultura sintrópica en Brasil es la Granja da Toca Orgânicos. Esta finca de 2300 ha de extensión, ha aplicado este enfoque desde 2012 (Debiase et al., 2016). Del total, aproximadamente 50 ha se han destinado a cultivos frutales y diversas especies vegetales promoviendo un sistema de producción eficiente y sostenible. Esta práctica ha permitido a que la granja mantenga una buena calidad del suelo, conservar los recursos hídricos y fomentar la biodiversidad, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental a largo plazo (Sitawi, 2020).

En términos de captura de carbono, un estudio en Missouri, EE.UU., analizó durante seis años el cambio en los niveles de carbono del suelo

mediante núcleos de suelo profundos (hasta 1 m). Los resultados mostraron un balance positivo en los sistemas sintrópicos, indicando una mayor absorción de carbono atmosférico. En contraste, los sistemas convencionales (suelos sin cobertura, monocultivos y uso intensivo de pesticidas) presentaron valores negativos, evidenciando una pérdida de carbono (Souza et al., 2023).

En regiones como Brasil y Puerto Rico, los sistemas sintrópicos han mejorado la fertilidad del suelo y han incrementado el almacenamiento de carbono por su diversificación vegetal (Robert, 2002). En Brasil, estos sistemas han demostrado ser particularmente efectivos en tierras degradadas, con tasas estimadas de secuestro de carbono en el suelo entre 1.5 a 5 t·ha⁻¹, en comparación con cifras significativamente menores en cultivos convencionales en la misma región (eg: Sandoval Estrada, Stolpe Lau, Zagal Venegas, Mardones Flores, y Junod Montano, 2003; FAO, 2017).

Si bien la agricultura sintrópica ha mostrado beneficios en términos de sostenibilidad ambiental, la agricultura convencional también ha incorporado prácticas orientadas a mitigar su impacto (Sriprapakhan et al., 2021). Prácticas como la labranza mínima, la rotación de cultivos y el uso de sistemas de riego eficientes, como el riego por goteo, han reducido la erosión del suelo, mejorado su estructura y optimizado la retención de agua y nutrientes (Granados, 2004). Estas técnicas también contribuyen a la conservación de la biodiversidad del suelo y al manejo responsable de los recursos hídricos (eg: Mergoni et al., 2024; Anastasiou et al., 2023; Pelai et al., 2020; Tyczewska, Twardowski, y Woźniak-Gientka, 2023).

Además, la transición hacia el Manejo Integrado de Plagas (MIP) ha permitido combinar pesticidas con métodos culturales, biológicos y mecánicos para reducir la dependencia de agroquímicos y mitigar su impacto ambiental (Gupta et al., 2024). Tecnologías emergentes como la agricultura de precisión, la biotecnología

y el uso de organismos genéticamente modificados (OGM) están fortaleciendo la resiliencia de los cultivos frente a las plagas, enfermedades y cambios climáticos, reforzando la capacidad de la agricultura convencional para enfrentar desafíos actuales y futuros (Singh et al., 2023; Majeed et al., 2023).

Aspectos socioeconómicos

La agricultura sintrópica y la convencional presentan enfoques socioeconómicos contrastantes. La agricultura convencional se enfoca en maximizar los rendimientos a corto plazo mediante el uso intensivo de insumos y mecanización, permitiendo economías a mayor escala y eficiencia productiva (Valtiala et al., 2023). Los monocultivos facilitan el control agrícola, optimizando la producción en menos tiempo y espacio (Corporación Autónoma de Cundinamarca CAR, (2012). Sin embargo, este modelo también conlleva riesgos, como el

agotamiento de nutrientes en el suelo, la reducción de la biodiversidad y la degradación a largo plazo de los ecosistemas agrícolas (Medina et al., 2018; Oliveira et al., 2024; Schürings et al., 2024).

Los costos de producción por hectárea de cultivos como zanahoria, apio, culantro, lechuga y brócoli varían significativamente entre los sistemas de agricultura convencional y sintrópica durante los años 2018, 2019 y 2020 (Figura 8). En los sistemas sintrópicos a largo plazo, los costos pueden disminuir entre 14 % y 65 %, dependiendo del cultivo. Esta reducción se debe a la menor dependencia de insumos externos en comparación con la agricultura convencional, que requiere grandes cantidades de agroquímicos (eg: Tapia Misayauri, 2021; Lucero Leyva-Abascal, Luna-Guevara, López-Olguín, Juárez-Ramón, y Ortega, 2023; Arce Quesada, 2020; Husain-Talero, 2018).

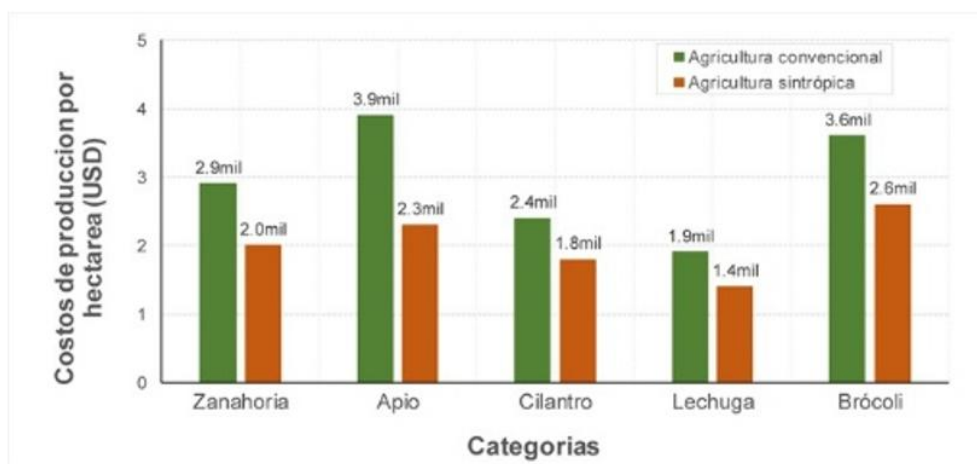


Figura 8. Comparación de costos de producción por sistema de cultivo. Fuente: adaptado de Gregio (2020), Arce Quesada (2020), Rawls (2002), Ávila et al. (2019) y Navarro García (2018).

Si bien la agricultura sintrópica exige una inversión inicial más alta debido a la implementación de sistemas agroforestales, a largo plazo puede ser más rentable. Se ha estimado que este enfoque reduce los costos de fertilizantes en un 50 %, aunque el manejo intensivo del sistema puede hacer que los costos laborales sean un 17 % más elevados. Aun así, el

costo total de producción puede ser menor (Gregio, 2020; Arce Quesada, 2020). Además, la resiliencia climática mejora en un 30 %, la diversidad de cultivos aumenta en un 40 % y se genera hasta un 25 % más de empleo, lo que contribuye a la estabilidad económica local y a la diversificación de los ingresos en un 20 % (Matsumura, 2016; Rawls, 2002; Ávila et al.,

2019; Navarro García, 2018; Estupiñán, Mejía y Gutiérrez, 2024; Ramírez-Argueta et al., 2022; Páez, 2019) (Figura 9).

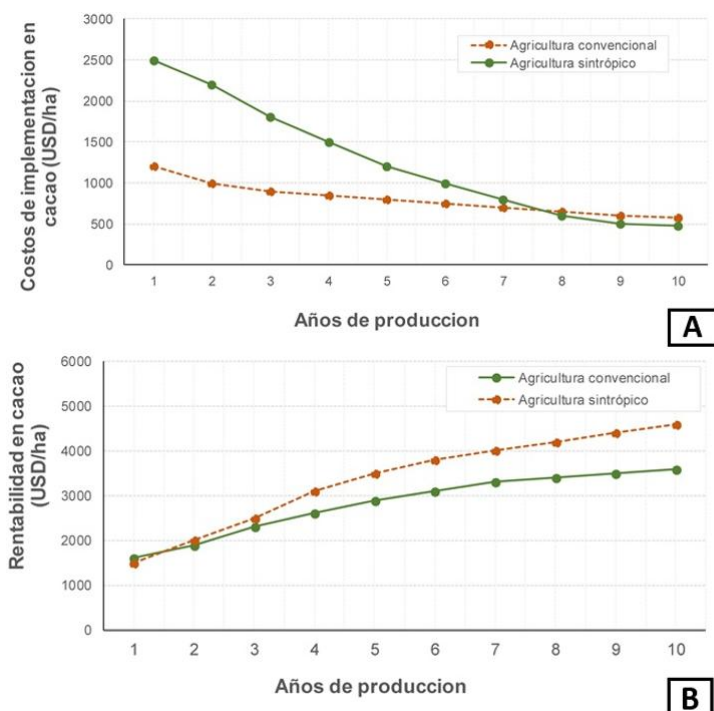


Figura 9. Comparación de costos de implementación y rentabilidad en el cultivo de cacao bajo sistemas de agricultura sintrópica y convencional. **(A)** Costos de implementación **(B)** Rentabilidad. Fuente: adaptado de Rawls (2002), Ávila et al. (2019), Navarro García (2018), Estupiñán, Mejía y Gutiérrez (2024), Ramírez-Argueta et al. (2022) y Páez (2019).

El creciente interés por la sostenibilidad ha impulsado la demanda de productos agrícolas orgánicos y regenerativos, lo que permite a los agricultores que adoptan la agricultura sintrópica acceder a mercados de nicho y obtener precios premium (Noscue & Prada, 2014). Sin embargo, la falta de estándares de certificación claros y reconocidos internacionalmente sigue siendo un obstáculo para su expansión y comercialización (Castillo, 2017; FAO, 2017).

Análisis crítico de los hallazgos

La comparación entre la agricultura sintrópica y la convencional revela un panorama complejo y multidisciplinario, que abarca aspectos ambientales, socioeconómicos y de sostenibilidad. A partir de la revisión de la literatura, se identifican hallazgos clave sobre ventajas y desafíos de cada enfoque. La agricultura convencional sigue siendo el modelo predominante, impulsado por la demanda de alimentos y avances tecnológicos. Sin embargo, estudios advierten impactos negativos como degradación del suelo, reducción de biodiversidad y dependencia de insumos externos. En este contexto, la agricultura

sintrópica surge como alternativa para mitigar estos efectos, promoviendo un uso más equilibrado de recursos y mayor sostenibilidad a largo plazo.

En términos de impacto sobre la calidad del suelo, la agricultura sintrópica demuestra beneficios significativos debido a su diversificación de cultivos y a la reducción del uso de agroquímicos. Estos factores contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo, estabilizar su estructura y aumentar la retención de carbono. En contraste, la agricultura convencional, caracterizada por la labranza intensiva y el uso frecuente de fertilizantes sintéticos y pesticidas, puede generar una disminución en la calidad y fertilidad del suelo con el tiempo (eg: Sánchez y Avellaneda, 2018; Escobar et al., 2011; Pavón et al., 2010).

Desde la perspectiva de productividad agrícola, se observan diferencias marcadas entre ambos sistemas. La agricultura convencional prioriza la maximización de los rendimientos en el corto plazo, mientras que la sintrópica se centra en el equilibrio ecológico y la resiliencia del sistema agrícola (Mandal et al., 2024; Otim et al., 2023; Filho et al., 2021). Si bien los rendimientos iniciales pueden ser menores en los sistemas sintrópicos, estudios sugieren que a largo plazo pueden mantenerse estables, al tiempo que se reducen los costos de insumos y se mejora la salud del suelo (Castillo, 2022).

En cuanto a la sostenibilidad ambiental, la agricultura sintrópica se posiciona como una alternativa más resiliente frente al cambio climático. Su capacidad de promover biodiversidad, conservar agua y secuestrar carbono ha sido ampliamente documentada (Sánchez et al., 2022). En comparación, la agricultura convencional enfrenta desafíos como el uso excesivo de agroquímicos, la erosión del suelo y la vulnerabilidad a condiciones climáticas extremas cada vez más frecuentes (Souza et al., 2023). Aunque ha dominado durante décadas por su eficacia en la producción de alimentos, los resultados sugieren que la agricultura sintrópica

puede garantizar seguridad alimentaria sin comprometer la estabilidad de los ecosistemas. No obstante, para generalizar su implementación, es necesario seguir investigando y desarrollar políticas que incentiven modelos agrícolas sostenibles (eg: Pasini, 2015; Sitawi, 2020; Mergoni et al., 2024; Majeed et al., 2023).

Desde una perspectiva socioeconómica, la agricultura sintrópica ofrece oportunidades en términos de reducción de costos de producción, diversificación de ingresos y fortalecimiento de la economía (Valtiala et al., 2023; Oliveira et al., 2024). Sus rendimientos pueden ser menores en comparación con la agricultura convencional, sus beneficios a largo plazo pueden compensar estas diferencias, especialmente en términos de residencia y sostenibilidad económica (Stange et al., 2023). Sin embargo, es crucial contar con un mayor apoyo institucional y político para facilitar la transición hacia sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes, capaces de afrontar los retos socioeconómicos y ambientales del futuro (Gregio, 2020; Rawls, 2002; Yadav et al., 2023).

Los resultados de esta revisión destacan que la adopción de la agricultura sintrópica puede reducir significativamente los costos de producción y aumentar la resiliencia frente a eventos climáticos extremos, un aspecto clave en regiones vulnerables como América Latina, donde los pequeños agricultores enfrentan condiciones económicas y ambientales adversas (Martínez Rodríguez et al., 2017; Husain-Talero, 2018).

En este sentido, el presente estudio puede servir como base para el diseño de políticas públicas que fomenten prácticas agrícolas sostenibles, mediante incentivos económicos, programas de capacitación y financiamiento para la implementación de sistemas sintrópicos. Estas estrategias no solo contribuirían a la estabilidad económica de los agricultores, sino que también fortalecerían la seguridad alimentaria y la conservación de los recursos naturales en el contexto del cambio climático.

Conclusiones

La comparación entre la agricultura sintrópica y la convencional evidencia diferencias sustanciales en enfoque, impacto y sostenibilidad. Los sistemas convencionales, aunque destacan por su alta productividad a corto plazo y facilidad de adopción, dependen intensivamente de agroquímicos, lo que puede comprometer la salud del suelo y los ecosistemas con el tiempo. Por su parte, la agricultura sintrópica promueve la regeneración de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, además de aumentar la resiliencia frente al cambio climático. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos como mayores costos iniciales, mayor demanda técnica y períodos de adaptación más largos. La integración de prácticas sintrópicas en sistemas convencionales se presenta como una estrategia viable para equilibrar productividad y sostenibilidad ambiental.

Contribución por autor

Todos los autores contribuyeron en el desarrollo de la metodología, investigación, análisis de datos, conceptualización, redacción, revisión y edición.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a todos quienes contribuyeron a la realización de este artículo. En especial, agradecemos a la profesora Susana Salazar Jaramillo y al profesor Walter Ossorio de la Universidad Nacional de Colombia, y al profesor Javier Eduardo Bonilla, de la Universidad Surcolombiana, por sus valiosos aportes que han sido fundamentales para el desarrollo del tema. También queremos agradecer al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (Minciencias) por la

beca otorgada para estudios de maestría a través de la Convocatoria 7. Agradecemos al Programa de Maestría en Geomorfología y Suelos de la Universidad Nacional de Colombia y a sus docentes.

Referencias

- Anastasiou, E., Fountas, S., Voulgaraki, M., Psiroukis, V., Koutsias, M., Kriezi, O., Lazarou, E., Vatsanidou, A., Fu, L., Bartolo, F. Di, Barreiro-Hurle, J., & Gómez-Barbero, M. (2023). Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis. *Smart Agricultural Technology*, 5(September). <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100323>.
- Andrade, D. V. P. (2019). Agricultura, meio ambiente e sociedade: Um estudo sobre a adotabilidade da agricultura sintrópica (Tesis de maestría). Universidade Federal do Rio de Janeiro. <https://repositorio.ufrj.br/handle/>.
- Arce Quesada, S. E. (2020). Análisis comparativo de precios y costos de producción de hortalizas cultivadas de manera orgánica y convencional. *Agronomía Costarricense*, 44(1), 1-28. <http://www.mag.go.cr/revagr/index.html>
- Atiqah Abdul Azam, F., bt Che Omar, R., bte Roslan, R., Baharudin, I. N. Z., & Muchlas, N. H. M. (2024). Enhancing the soil stability using biological and plastic waste materials integrated sustainable technique. *Alexandria Engineering Journal*, 91(February), 321–333. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.02.016>.
- Ávila, J. E., Bertolini, M. P., Lima, L. A., Vaz, J. M., & Borges, C. L. P. (2019). Agricultura Convencional x Agricultura Sintrópica: Um Estudo Comparativo Entre as Práticas de Produção. En *Anais do III Congresso Paranaense de Agroecologia (III CPA) – III Paraná Agroecológico*, 5-9 de novembro de 2018, Foz do

Iguaçu, PR, Brasil. Recuperado de http://www.agrofloresta.net/static/artigos/agroforestry_1992_gotsch.pdf

Calderón-Medina, C. L., Bautista-Mantilla, G. P., & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141–157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>.

Casas Pardo, M. L. (2023). De ciudadanos sostenibles y para los ODS 2030. En *Memorias 2.º Foro de Educación para la Sostenibilidad*. Institución Universitaria Colombo Americana – ÚNICA.

Castillo Ruíz, C. (2017). Factores que limitan la adopción de los sistemas agroforestales (Tesis de maestría). Universidad de Manizales.

Castillo, L. (2022). Análisis de la cobertura vegetal y uso del suelo para identificar el potencial de captura de carbono en la zona de amortiguación del Parque Natural Regional Serranía de las Quinchas (Tesis). Universidad Santo Tomás, Tunja. <http://hdl.handle.net/11634/47477>.

Chalán, J. (2019). Agricultura convencional y agroecología frente al cambio climático (Tesis de maestría). Universidad Andina Simón Bolívar. <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6634/1/T2860-MDSCC-Chalan-Agricultura.pdf>

Clavijo, L. (2013). Entre la agricultura convencional y la agroecología. El caso de las prácticas de manejo en los sistemas de producción campesina en el municipio de silvania. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 1–116.

Connor, D. J. (2022). Relative yield of food and efficiency of land-use in organic agriculture: A

regional study. *Agricultural Systems*, 199, 103404.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103404>

Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR). (2012). Diagnóstico por erosión. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b9045459a4e5.pdf>

De Marco, C., & Kunin, J. (2022). Agricultura convencional, educación y poblaciones infantojuveniles: las miradas de AACREA Y Aapresid. *Anuario Del Instituto de Historia Argentina*, 22(1), e161. <https://doi.org/10.24215/2314257xe161>

De Melo Virginio Filho, E., Somarriba, E., Cerda, R., Casanoves, F., Cordero, C. A., Avelino, J., Roupsard, O., Rapidel, B., Vaast, P., Harmand, J.-M., Staver, C., Beer, J., Mora, A., Morales, V. H., Fonseca, C., Vargas, V. J., Ramírez, L. G., Soto, G., Isaac, M. E., ... Haggard, J. (2021). Aportes a la investigación, fortalecimiento de capacidades y formulación de políticas para el sector cafetalero en 20 años de ensayos de sistemas agroforestales con café. *AgroForestería En Las Américas*, 51, 107–151. <http://hdl.handle.net/11554/11143>

Debiase, G., Montemurro, F., Fiore, A., Rotolo, C., Farrag, K., Miccolis, A., & Brunetti, G. (2016). Organic amendment and minimum tillage in winter wheat grown in Mediterranean conditions: Effects on yield performance, soil fertility and environmental impact. *European Journal of Agronomy*, 75, 149–157. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.009>

Díaz Mendoza, C. (2011). Alternatives for erosion control by using conventional coverage, nonconventional coverage and revegetation. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 80–90. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v31n3.26390>

Dumont, A. M., Gasselin, P., & Baret, P. V. (2020). Transitions in agriculture: Three frameworks highlighting coexistence between a new agroecological configuration and an old, organic and conventional configuration of vegetable production in Wallonia (Belgium). *Geoforum*, 108(March 2019), 98–109. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.11.018>

Escobar, O. Z., Saravia, J. C. O., Guependo, R. C., & Ospina, J. A. P. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos Degradados por Salinidad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(1), 5769–5779. <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=179922364003>

Estupiñán, S., Mejía, D., & Gutiérrez, J. F. (2024). Análisis de costos de producción de cacao bajo diferentes estructuras de sistemas tecnológicos. *Solidaridad*.

Fallas, G., Chacón, M., & Castro, J. (2009). Sostenibilidad de sistemas agrícolas de fincas ecológicas y tradicionales en Costa Rica. *UNED Research Journal*, 1(2), 151–161. <https://doi.org/10.22458/urj.v1i2.228>

Gatteli, V. M., & Westphalen, F. (2022). Agricultura sintrópica como medida mitigadora dos impactos da emergência climática (Tesis de pregrado, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen). <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/26076>

Gietzen, R. (2020). Abundancia agroforestal. *Notas de Desarrollo ECHO (EDN)*, 146. <https://www.echocommunity.org/resources/edn146>.

Gobierno de la República de Nicaragua. (2000). CEO (Informe técnico). Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales. <http://www.marena.gob.ni/Enderedd/wp-content/uploads/Docs/Documentos%20Tecnicos/Geo%20IV.pdf>

González, P. (2023, diciembre). Agricultura sostenible. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/asesoriasparlamentarias/>

Gotsch, E. (2021). *El Tao*. Agua Tierra Ediciones, 25. http://ibdigital.uib.cat/greenstone/collect/sufi/index/assoc/sufi_200/2_n0003_/p027.dir/sufi_2002_n0003_p027.pdf

Granados, C. (2004). El impacto ambiental del café en la historia costarricense. *Diálogos Revista Electrónica*, 4(2), 120. <https://doi.org/10.15517/dre.v4i2.6280>

Gregio, J. V. (2020). Da degradação à floresta: A Agricultura Sintrópica de Ernst Götsch e sua aplicação nas Fazendas Olhos D'Água e Santa Teresinha, Piraí do Norte/BA. *AMBIENTES: Revista de Geografia e Ecologia Política*, 2(2), 106. <https://doi.org/10.48075/amb.v2i2.26585>

Gupta, R., Malik, P., Rani, R., Solanki, R., Ameta, R. K., Malik, V., & Mukherjee, T. K. (2024). Recent progress on nanoemulsions mediated pesticides delivery: Insights for agricultural sustainability. *Plant Nano Biology*, 8(March), 100073. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100073>

Ha, L. T. (2023). An investigation of digital integration's importance on smart and sustainable agriculture in the European region. *Resources Policy*, 86(PA), 104158. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104158>

Hameed Ologunde, O., Kehinde Bello, S., & Abolanle Busari, M. (2024). Integrated agricultural system: A dynamic concept for improving soil quality. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 23(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2024.03.002>

Holzmüller, E. J. (2009). Toward agroforestry design: An ecological approach. *Forest Science*, 55(4), 374–380. <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.4.374>

Husain-Talero, S. (2018). Análisis de los costos de producción y la cadena de valor de las plantas tradicionales que cultivan los campesinos de Cundinamarca, Colombia. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 15(82), 1–18. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11757724003>

Jose, S., Batish, D. R., Kohli, R. K., & Singh, H. P. (2007). *Ecological basis of agroforestry* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420043365>

Laurance, W. F., Sayer, J., & Cassman, K. G. (2014). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology & Evolution*, 29(2), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2013.12.001>

Lucero Leyva-Abascal, M., Luna-Guevara, J. F., López-Olguín, J. F., Juárez-Ramón, D., & Ortega, Y. (2023). Cultivo, cosecha y postcosecha en el sistema productivo cilantro (*Coriandrum sativum* L.). *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20(3), 1–17. <https://doi.org/10.22231/asyd.v20i3.1549>

Majeed, H., Iftikhar, T., Ahmad, K., Qureshi, K., Tabinda, F., Altaf, I., Iqbal, A., Ahmad, S., & Khalid, A. (2023). Bulk industrial production of sustainable cellulosic printing fabric using agricultural waste to reduce the impact of

climate change. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253(P3), 126885. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126885>

Mandal, S., Yadav, A., Panme, F. A., Devi, K. M., & Kumar, S. M. (2024). Adaptation of smart applications in agriculture to enhance production. *Smart Agricultural Technology*, 7(January), 100431. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100431>

Martin, R. M., Stern, L., Swg, R., Nc, V., Fgn, G., Fg, E., Gp, C. N. K., Swg, G. N., & Dquswglcp, U. G. (2008). Deforestación, cambio de uso de la tierra y REDD. *Unasylva*, 59, 3–11. <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/011/i0440s/i0440s02.pdf>

Martínez Rodríguez, M. R., Viguera, B., Donatti, C., & Alpizar, F. (2017). Cómo enfrentar el cambio climático desde la agricultura: Prácticas de adaptación basadas en ecosistemas (AbE). *Materiales de fortalecimiento de capacidades técnicas del Proyecto CASCADA (Conservación Internacional-CATIE)*, 41.

Matsumura, E. S. [UNESP]. (2016). A agricultura convencional e a agricultura sintrópica: uma discussão inicial. *Aleph*, 48 f. <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/140195/000866765.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://alsafi.ead.unesp.br/handle/11449/140195>

Mergoni, A., Dipierro, A. R., & Colamartino, C. (2024). European agricultural sector: The tortuous path across efficiency, sustainability and environmental risk. *Socio-Economic Planning Sciences*, 92(February), 101848. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2024.101848>

Michelon, J. D. (2019). Sistemas agroflorestais, agricultura sintrópica e recuperação de áreas

degradadas. Progress in Retinal and Eye Research, 561. Recuperado de

Navarro García, A. (2018). La agricultura ecológica frente a la convencional: ¿Es más rentable? Un estudio del caso [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Comillas]. Repositorio de la Universidad Pontificia Comillas. Recuperado de

Nepal, S., Neupane, N., Koirala, S., Lautze, J., Shrestha, R. N., Bhatt, D., Shrestha, N., Adhikari, M., Kaini, S., Karki, S., Yangkhurung, J. R., Gnawali, K., Singh Pradhan, A. M., Timsina, K., Pradhananga, S., & Khadka, M. (2024). Integrated assessment of irrigation and agriculture management challenges in Nepal: An interdisciplinary perspective. *Heliyon*, 10(9), e29407.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29407>

Noscue, E. A., & Prada, J. A. (2014). Adopción de los sistemas agroforestales con el cultivo del café (*Coffea arábica*). Repositorio Institucional de La Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 1, 1–71.

<http://repository.unad.edu.co/handle/10596/2654>

Oliveira Prata, L. A. de. (2023). Polycultivation and agroforestry systems impact the vegetative growth of vegetables. *Revista de Agricultura Neotropical*, 10(4), e7544.

<https://doi.org/10.32404/rean.v10i4.7544>

Oliveira, E. M., Wittwer, R., Hartmann, M., Keller, T., & van der Heijden, M. G. (2024). Effects of conventional, organic and conservation agriculture on soil physical properties and their relations to root growth and microbial habitats in a long-term field experiment. *Geoderma*, 447, 116927.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116927>

Olivera Sánchez, C., & Avellaneda Torres, L. M. (2018). Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales: construcción participativa del diagnóstico de suelos, diseño de planes de intervención prácticas de manejo sostenible de los suelos. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/35025>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: La gestión de los sistemas en situación de riesgo. FAO y Mundi-Prensa.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2015). Agricultura sostenible una herramienta para fortalecer la seguridad alimentaria y nutricional en América Latina y el Caribe. Organización de Las Naciones Unidas Para La Agricultura y La Alimentación, 48. <https://www.fao.org/3/i5754s/i5754s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2017). Carbono orgánico del suelo: El potencial oculto.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO. (2019). El trabajo de la FAO sobre el cambio climático: Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático 2019 (Informe No. 40).

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-i8037s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2024, octubre). Indicadores específicos sobre alimentación y agricultura. FAO. Recuperado el [fecha de acceso], de <https://www.fao.org/faostat/es/#data>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia.

Osorio, E. M. C., & Yepes, J. C. F. (2018). Concepciones de ambiente de pobladores del municipio de Planadas Tolima víctimas del conflicto armado y en situación de posconflicto. *Energies*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.reuma.2018.06.001>

Otim, J., Watundu, S., Mutenyo, J., Bagire, V., & Adaramola, M. S. (2023). Effects of carbon dioxide emissions on agricultural production indexes in East African community countries: Pooled mean group and fixed effect approaches. *Energy Nexus*, 12(October), 100247. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100247>

Pasini, A. A. (2015). ¿Qué es la agricultura sintrópica y cómo pueden beneficiarse de ella los agricultores? Recuperado de <https://wikifarmer.com/es/que-es-la-agricultura-sintrópica-y-como-pueden-beneficiarse-de-ella-los-agricultores/?amp>

Patiño, G. R., Ramos, J. M., & Salazar, J. C. S. (2016). Incidencia de sistemas agroforestales con *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg. sobre propiedades físicas de suelos de lomerío en el departamento de Caquetá, Colombia. *Acta Agronomica*, 65(2), 116–122. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n2.45173>

Pavón, J. del C., Madero, M. E., & Amézquita, E. (2010). Susceptibilidad del suelo a la degradación en parcelas con manejo agroforestal Quesungual en Nicaragua. *Acta Agronómica*, 59(1), 46–54. http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/14031/14931

Pelai, R., Hagerman, S. M., & Kozak, R. (2020). Biotechnologies in agriculture and forestry: Governance insights from a comparative

systematic review of barriers and recommendations. *Forest Policy and Economics*, 117(April), 102191. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102191>

Peng, W., Zheng, H., Robinson, B. E., Li, C., & Li, R. (2022). Comparing the importance of farming resource endowments and agricultural livelihood diversification for agricultural sustainability from the perspective of the food–energy–water nexus. *Journal of Cleaner Production*, 380(P2), 135193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135193>

Pereira, S. M., Hoffman, M. R., & Salemi, L. F. (2024). Soil physical properties in an oxisol under a syntropic agroforestry system: row versus inter-row. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(2), 838–844. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p838-844>

Páez, J. (2019). Análisis económico y financiero de sistemas agroforestales con cacao en Guatemala. Rikolto.

Qiao, D., Luo, Y., Chu, Y., Zhang, H., & Zhao, F. (2024). Decomposition of agriculture-related non-CO2 greenhouse gas emissions in Chengdu: 1995–2020. *Journal of Cleaner Production*, 434(December 2023), 140125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140125>

Raimondi, G., Maucieri, C., Squartini, A., Stevanato, P., Tolomio, M., Toffanin, A., & Borin, M. (2023). Soil indicators for comparing medium-term organic and conventional agricultural systems. *European Journal of Agronomy*, 142(July 2022), 126669. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126669>

Ramírez-Argueta, O., Orozco-Aguilar, L., Dubón Dubón, A., Díaz, F. J., Sánchez, J., & Casanoves, F. (2022). Crecimiento de la madera, rendimientos de cacao e ingresos financieros en un

experimento a largo plazo de sistemas agroforestarios de cacao en el norte de Honduras. *Frente. Susten. Food Syst.*, 6.

Rasul, G., & Thapa, G. B. (2004). Sustainability of ecological and conventional agricultural systems in Bangladesh: An assessment based on environmental, economic and social perspectives. *Agricultural Systems*, 79(3), 327–351. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00090-8](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00090-8)

Rawls, J. (2002). Ecología y conservación. En *La justicia como equidad: Una reformulación* (pp. 23–65). http://www.vicensvives.com/vvweb/view/web_widgets/ibextras/docs/14_IB_Bio_001-075.pdf?ext=.pdf

Rivera, D. (2019). Agricultura tradicional de roza, tumba y quema en el bosque seco de la Reserva Natural Victoria (Melgar, Tolima): Transición a la no quema (Tesis de maestría). Universidad Externado de Colombia, Facultad de Ciencias Sociales y Humanas, Maestría Transdisciplinaria en Sistemas de Vida Sostenible.

Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96. FAO. <http://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=OKZt9agfRksC>

Sandoval Estrada, M., Stolpe Lau, N., Zagal Venegas, E., Mardones Flores, M., & Junod Montano, J. (2003). El secuestro de carbono en la agricultura y su importancia con el calentamiento global. *The Carbon Sequestration in Agriculture and its Importance in Global Warming. Theoria*, 12(1), 65–71. Universidad del Bío Bío.

Santos Rebello, J. F. D., & Ghiringhello Sakamoto, D. (2021). *Agricultura sintrópica según Ernst Gotsch*. Editora Reviver.

Sarandón, S. J. (2020). El papel de la agricultura en la transformación social-ecológica de América Latina. En *Friedrich-Ebert-Stiftung (FES)*. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/mexiko/16550.pdf>

Schürings, C., Kail, J., Kaijser, W., & Hering, D. (2024). Effects of agriculture on river biota differ between crop types and organism groups. *Science of the Total Environment*, 912(August 2023), 168825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168825>

Sharry, S. E., Stevani, R. A., & Galarco, P. (2022). *Sistemas agroforestales en Argentina*. Libros de Cátedra. <https://doi.org/10.35537/10915/131898>

Silva, J. M. C. da, Prasad, S., & Diniz-Filho, J. A. F. (2017). The impact of deforestation, urbanization, public investments, and agriculture on human welfare in the Brazilian Amazonia. *Land Use Policy*, 65(March), 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.003>

Silva, S., & Correa, F. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13–34. <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2>

Singh, N. K., Sanghvi, G., Yadav, M., Padhiyar, H., Christian, J., & Singh, V. (2023). Fate of pesticides in agricultural runoff treatment systems: Occurrence, impacts and technological progress. *Environmental Research*, 237(P2), 117100. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117100>

SITAWI. (2020). primer título verde de Fazenda da Toca en 2021. <https://www.ecoagro.agr.br/storage/Arquivo/161894531585.pdf>

Smith, L. E. D., & Siciliano, G. (2015). A comprehensive review of constraints to improved management of fertilizers in China and mitigation of diffuse water pollution from agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 209, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.016>

Souza, L. F. T., Hirmas, D. R., Sullivan, P. L., Reuman, D. C., Kirk, M. F., Li, L., Ajami, H., Wen, H., Sarto, M. V. M., Loecke, T. D., Rudick, A. K., Rice, C. W., & Billings, S. A. (2023). Root distributions, precipitation, and soil structure converge to govern soil organic carbon depth distributions. *Geoderma*, 437(May), 116569. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116569>

Sriprapakhan, P., Artkla, R., Nuanual, S., & Maneechot, P. (2021). Economic and ecological assessment of integrated agricultural bio-energy and conventional agricultural energy frameworks for agriculture sustainability. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(4), 227–234. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.02.001>

Stange, M., Tieding, M., Brinitzer, G., & Ihlenfeldt, S. (2023). Target costing as an approach to reduce costs in closed-loop agriculture systems: Application for the cultivation of algae in photobioreactors. *Procedia CIRP*, 116, 372–377. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.063>

Sumberg, J., & Giller, K. E. (2022). What is 'conventional' agriculture? *Global Food Security*, 32(January), 100617. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2022.100617>

Sánchez, J. D. L., Canabal, V. A. G., & Armbrecht, I. (2022). Mycelium length and glomalin in arbuscular mycorrhizae: Soil aggregation in Andean forests and agroecosystems. *Acta Agronómica*, 71(2), 139–147. <https://doi.org/10.15446/acag.v71n2.101536>

Tapia Misayauri, T. L. (2021). Rentabilidad y costo de producción en el cultivo de zanahoria de los agricultores del distrito de Marcatuna - 2019 (Trabajo de investigación para optar el grado de Bachiller en Contabilidad, Universidad Continental). Facultad de Ciencias de la Empresa, Escuela Académico Profesional de Contabilidad. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/9129>

Tavarez, M., & Miguel, C. de. (2014). El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe: Textos seleccionados 2012-2014. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37791/LCM23_es.pdf

Tyczewska, A., Twardowski, T., & Woźniak-Gientka, E. (2023). Agricultural biotechnology for sustainable food security. *Trends in Biotechnology*, 41(5), 331–341. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.12.013>

Valtiala, J., Niskanen, O., Torvinen, M., Riekkinen, K., & Suokannas, A. (2023). The relationship between agricultural land parcel size and cultivation costs. *Land Use Policy*, 131(May), 106728. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106728>

Van den Bergh, S. G., Chardon, I., Leite, M. F. A., Korthals, G. W., Mayer, J., Cougnon, M., Reheul, D., de Boer, W., & Bodelier, P. L. E. (2024). Soil aggregate stability governs field greenhouse gas fluxes in agricultural soils. *Soil Biology and*

Biochemistry, 191(February).
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109354>

Vermeulen, S. J., Campbell, B. M., & Ingram, J. S. I. (2012). Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 37, 195–222. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-020411-130608>

Yadav, N., Garg, V. K., Chhillar, A. K., & Rana, J. S. (2023). Recent advances in nanotechnology for the improvement of conventional agricultural systems: A review. *Plant Nano Biology*, 4(August 2022), 100032.
<https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100032>