

Artículo Original

Diversidad de insectos polinizadores y su relación con la productividad de sistemas agrícolas diversificados

Diversity of insect pollinators and its relationship with the productivity of diversified agricultural systems

Joaquín Alberto Saucedo Zamora^{1*}  

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza-México

*Autor de correspondencia: Joaquín Alberto Saucedo Zamora 

Recibido: 01-02-2026

Revisado: 08-02-2026

Aceptado: 15-02-2026

Publicado: 22-02-2026

Cómo citar este artículo: Saucedo Zamora, J. A. (2026). Diversidad de insectos polinizadores y su relación con la productividad de sistemas agrícolas diversificados. *Viterra*, 4(1), 1-12.
<https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/32>

RESUMEN

La diversidad de insectos polinizadores constituye un componente fundamental para el funcionamiento de los agroecosistemas debido a su contribución a la reproducción de las plantas, estabilidad ecológica y productividad de numerosos cultivos. Sin embargo, la intensificación agrícola, simplificación del paisaje, pérdida de hábitats naturales y reducción de recursos florales pueden afectar la riqueza y abundancia de estos organismos, comprometiendo los servicios ecosistémicos de polinización. El objetivo de la investigación fue evaluar la diversidad de insectos polinizadores y determinar su relación con la productividad de sistemas agrícolas con diferentes niveles de diversificación. Se desarrolló una investigación cuantitativa, observacional, correlacional y comparativa en 18 unidades productivas clasificadas en sistemas de baja, media y alta diversificación agrícola, con seis unidades por categoría. El muestreo de insectos fue realizado mediante transectos de observación, redes entomológicas y trampas de colores durante 12 jornadas distribuidas a lo largo del período de floración de los cultivos. Se registraron 3.846 individuos pertenecientes a 96 especies, 54 géneros, 22 familias y cuatro órdenes de insectos. La diversidad fue evaluada mediante riqueza específica, abundancia, índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou. La productividad agrícola fue determinada mediante rendimiento por hectárea, porcentaje de frutos formados, peso promedio de frutos y proporción de frutos comercializables. Los sistemas altamente diversificados presentaron una riqueza promedio de 61,3 especies y un índice de Shannon de 3,42, mientras que los sistemas de baja diversificación alcanzaron 29,7 especies y un índice de 2,18. La productividad promedio fue significativamente superior en los sistemas altamente diversificados, con un rendimiento de 18,7 t ha⁻¹ frente a 13,2 t ha⁻¹ registrados en los sistemas de baja diversificación. La riqueza de polinizadores presentó una correlación positiva con el rendimiento agrícola ($r = 0,74$; $p < 0,001$) y con el porcentaje de frutos formados ($r = 0,79$; $p < 0,001$). Se concluye que la diversificación de los sistemas agrícolas favorece la conservación de comunidades de insectos polinizadores y contribuye al incremento y estabilidad de la productividad mediante el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos de polinización.

Palabras clave: agroecosistemas; biodiversidad; insectos polinizadores; productividad agrícola; servicios ecosistémicos; sistemas diversificados.

ABSTRACT

The diversity of insect pollinators is a fundamental component of agroecosystem functioning due to its contribution to plant reproduction, ecological stability, and the productivity of numerous crops. However, agricultural intensification, landscape simplification, loss of natural habitats, and reduction of floral resources can affect the richness and abundance of these organisms, compromising ecosystem pollination services. The objective of this research was to evaluate insect pollinator diversity and determine its relationship with the productivity of agricultural systems with different levels of diversification. A quantitative, observational, correlational, and comparative study was conducted in 18 production units classified as low, medium, and highly diversified agricultural systems, with six units

per category. Insect sampling was conducted using observation transects, entomological nets, and coloured pan traps during 12 sampling sessions distributed throughout the crop flowering period. A total of 3,846 individuals belonging to 96 species, 54 genera, 22 families, and four insect orders were recorded. Diversity was assessed using species richness, abundance, Shannon-Wiener and Simpson indices, and Pielou evenness. Agricultural productivity was determined through yield per hectare, fruit set percentage, average fruit weight, and proportion of marketable fruits. Highly diversified systems showed an average richness of 61.3 species and a Shannon index of 3.42, while low-diversification systems reached 29.7 species and an index of 2.18. Average productivity was significantly higher in highly diversified systems, with a yield of 18.7 t ha⁻¹ compared with 13.2 t ha⁻¹ recorded in low-diversification systems. Pollinator richness was positively correlated with agricultural yield ($r = 0.74$; $p < 0.001$) and fruit set percentage ($r = 0.79$; $p < 0.001$). It is concluded that agricultural system diversification favours the conservation of insect pollinator communities and contributes to increased and stable productivity by strengthening ecosystem pollination services.

Keywords: agricultural productivity; agroecosystems; biodiversity; diversified systems; ecosystem services; insect pollinators.

1. INTRODUCCIÓN

La producción agrícola depende de una compleja interacción de procesos ecológicos que determinan el funcionamiento, la estabilidad y la productividad de los agroecosistemas. Entre ellos, la polinización constituye uno de los servicios ecosistémicos más relevantes, debido a que participa directamente en la reproducción de un elevado número de especies vegetales cultivadas y silvestres. Potts et al. (2016) demostraron que una parte importante de los cultivos de importancia económica depende, en diferentes niveles, de la polinización realizada por animales, mientras que Rader et al. (2015) estimaron que la gran mayoría de las plantas con flores mantienen relaciones de dependencia con diversos grupos de polinizadores. En este contexto, la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES, 2016) reconoce la polinización como un proceso indispensable para la seguridad alimentaria, la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad de la producción agrícola.

Los insectos polinizadores desempeñan un papel esencial dentro de este proceso al transportar el polen entre las estructuras reproductivas de las flores, favoreciendo la fecundación, la formación de frutos y la producción de semillas. Más allá de incrementar el rendimiento de numerosos cultivos, estos organismos contribuyen al mantenimiento de la diversidad vegetal y a la estabilidad funcional de los ecosistemas agrícolas. En consecuencia, la conservación de las comunidades de polinizadores representa una estrategia de importancia ecológica y productiva para garantizar la provisión continua de este servicio ecosistémico. Garibaldi et al. (2016) demostraron que los polinizadores silvestres incrementan significativamente la formación de frutos independientemente de la abundancia de abejas manejadas, mientras que Dainese et al. (2019) confirmaron, mediante una síntesis global, que la biodiversidad favorece la productividad agrícola al fortalecer procesos ecológicos esenciales como la polinización y el control biológico.

Durante las últimas décadas, la disminución de las poblaciones de insectos polinizadores ha despertado una creciente preocupación científica debido a sus posibles implicaciones sobre la producción de alimentos y la estabilidad de los ecosistemas. La expansión de monocultivos, la simplificación del paisaje agrícola, la pérdida de hábitats naturales, el uso intensivo de agroquímicos y la reducción de los recursos florales modifican la composición y el funcionamiento de las comunidades de polinizadores, afectando la provisión de los servicios ecosistémicos que sustentan la producción agrícola. Tamburini et al. (2020) señalan que la intensificación agrícola representa uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad en los agroecosistemas, mientras que Dicks et al. (2021) evidenciaron que tanto las prácticas locales de manejo como la estructura del paisaje influyen significativamente sobre la riqueza y abundancia de las abejas silvestres.

La disminución de la diversidad de polinizadores trasciende el ámbito ecológico y genera repercusiones directas sobre la productividad agrícola. IPBES (2016) advierte que la reducción de las poblaciones de polinizadores puede afectar la producción de alimentos, la estabilidad de los sistemas agrícolas y el bienestar humano, debido a la estrecha dependencia existente entre numerosos cultivos y la polinización animal. Asimismo, Dainese et al. (2019) demostraron

que la pérdida de biodiversidad disminuye la capacidad de los agroecosistemas para mantener servicios ecosistémicos fundamentales, incrementando la dependencia de insumos externos y reduciendo la sostenibilidad de la producción. Los agroecosistemas constituyen sistemas dinámicos donde interactúan procesos ecológicos, componentes biológicos y prácticas de manejo implementadas por los agricultores. La forma en que estos sistemas son estructurados puede favorecer o limitar la permanencia de las comunidades de insectos polinizadores. Los sistemas agrícolas simplificados, caracterizados por la predominancia de monocultivos y una escasa heterogeneidad del paisaje, suelen ofrecer recursos florales durante periodos limitados y presentan reducida disponibilidad de refugios para los insectos. Kleijn et al. (2015) demostraron que la intensificación agrícola disminuye la contribución de las abejas nativas a la polinización de los cultivos, mientras que Dicks et al. (2021) identificaron una disminución significativa de la diversidad de polinizadores en paisajes agrícolas con baja complejidad estructural.

En contraste, los sistemas agrícolas diversificados incorporan diferentes cultivos, árboles, cercas vivas, vegetación espontánea, franjas florales y remanentes de hábitats naturales que incrementan la heterogeneidad ambiental y proporcionan alimento y refugio durante gran parte del año. Tamburini et al. (2020) demostraron que la restauración de cercas vivas favorece las poblaciones de abejas nativas y facilita su desplazamiento hacia los cultivos adyacentes. De igual manera, Dicks et al. (2021) concluyeron que la disponibilidad continua de recursos florales y la conservación de elementos seminaturales incrementan significativamente la riqueza y abundancia de los polinizadores silvestres dentro de los paisajes agrícolas.

La diversificación agrícola también fortalece la estabilidad ecológica de los agroecosistemas al favorecer comunidades biológicas funcionalmente más complejas. Woodcock et al. (2019) demostraron que las comunidades diversas de polinizadores incrementan el éxito reproductivo de las plantas mediante procesos de complementariedad funcional, ya que diferentes especies presentan horarios de actividad, preferencias florales y comportamientos de forrajeo distintos. Esta diversidad funcional permite mantener el servicio de polinización bajo condiciones ambientales variables, incrementando la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a perturbaciones naturales y antrópicas.

La diversidad funcional de los polinizadores constituye uno de los mecanismos ecológicos que explican la relación entre biodiversidad y productividad agrícola. Cuando diferentes especies participan en el proceso de polinización, aumentan las probabilidades de que las flores sean visitadas bajo distintas condiciones ambientales y en diferentes momentos del día, favoreciendo una transferencia de polen más eficiente. Garibaldi et al. (2016) demostraron que la presencia de comunidades diversas incrementa la formación de frutos incluso en sistemas donde existen abejas manejadas, evidenciando que las especies silvestres aportan funciones complementarias que no pueden ser sustituidas por un único grupo de polinizadores. En la misma línea, Dainese et al. (2019) señalaron que la conservación de la biodiversidad fortalece la provisión de servicios ecosistémicos y contribuye de manera significativa al incremento del rendimiento agrícola.

La estabilidad del servicio de polinización depende igualmente de la capacidad de las comunidades para responder frente a las perturbaciones ambientales. Dicks et al. (2021) evidenciaron que las especies de abejas presentan respuestas diferentes ante las alteraciones provocadas por la actividad humana, de modo que la presencia de comunidades diversas incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a cambios en el uso del suelo o modificaciones del paisaje. En consecuencia, la pérdida progresiva de especies reduce la capacidad del sistema para mantener procesos ecológicos estables y aumenta la vulnerabilidad de la producción agrícola.

La transformación del paisaje constituye uno de los principales factores asociados con la disminución de la diversidad de polinizadores. La eliminación de remanentes de vegetación natural, la fragmentación de hábitats y la reducción de recursos florales limitan las posibilidades de alimentación, refugio y reproducción de numerosos insectos. Tamburini et al. (2020) demostraron que los servicios de polinización disminuyen conforme aumenta la distancia entre los cultivos y los hábitats naturales, mientras que Tamburini et al. (2020) observaron que esta reducción ocurre incluso en regiones con elevada biodiversidad. Estos resultados resaltan la importancia de conservar elementos naturales dentro de los paisajes agrícolas para mantener poblaciones estables de polinizadores.

La incorporación de cercas vivas, corredores biológicos, árboles dispersos, franjas florales y vegetación espontánea constituye una estrategia ampliamente reconocida para incrementar la conectividad ecológica dentro de los agroecosistemas. Tamburini et al. (2020) demostraron que la restauración de cercas vivas favorece el establecimiento de abejas nativas y mejora el desplazamiento de los polinizadores hacia los cultivos, mientras que Dicks et al. (2021) señalaron que estos elementos incrementan la disponibilidad de recursos durante diferentes épocas del año y fortalecen la permanencia de comunidades biológicamente más diversas.

La intensificación agrícola también modifica la estructura de las comunidades de insectos polinizadores. Kleijn et al. (2015) demostraron que el incremento de la intensidad productiva disminuye la contribución de las abejas nativas a la polinización de los cultivos, favoreciendo una mayor dependencia de especies manejadas. Sin embargo, Tamburini et al. (2020) advierten que esta estrategia puede incrementar la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas frente a enfermedades, fluctuaciones poblacionales y cambios ambientales, debido a la reducción de la diversidad funcional de los organismos responsables de la polinización.

La abundancia de insectos, por sí sola, no refleja adecuadamente la complejidad de las comunidades biológicas. Un agroecosistema puede albergar un elevado número de individuos pertenecientes a pocas especies y, aun así, presentar una diversidad reducida. Por esta razón, la evaluación ecológica requiere integrar indicadores relacionados con la riqueza específica, la abundancia, la dominancia y la equidad de las especies. Roswell et al. (2021) destaca que el índice de Shannon-Wiener permite valorar simultáneamente la riqueza y la distribución relativa de las abundancias, mientras que Roswell et al. (2021) señalan que la utilización conjunta de diferentes índices proporciona una caracterización más completa de la estructura de las comunidades biológicas.

Diversas investigaciones han demostrado que la diversidad de los polinizadores responde tanto a las características del sistema agrícola como al contexto paisajístico donde se desarrolla la producción. Tamburini et al. (2020) encontraron que la riqueza y abundancia de abejas visitantes de flores varían de acuerdo con el sistema de manejo, la composición del paisaje y la disponibilidad de hábitats circundantes. Posteriormente, Dicks et al. (2021) confirmaron que la combinación de factores locales y paisajísticos determina la estructura de las comunidades de polinizadores, resaltando la necesidad de integrar ambas escalas en el diseño de estrategias de conservación.

La relación entre biodiversidad y productividad constituye actualmente uno de los principales temas de investigación dentro de la ecología agrícola. Durante muchos años, el incremento de la producción se sustentó principalmente en la intensificación del uso de fertilizantes, pesticidas y otras tecnologías. No obstante, la evidencia científica demuestra que numerosos servicios ecosistémicos proporcionados por la biodiversidad pueden incrementar la productividad agrícola de forma sostenible. En este sentido, Dainese et al. (2019) demostraron que la biodiversidad favorece simultáneamente la polinización y otros procesos ecológicos esenciales para la producción de cultivos, mientras que Garibaldi et al. (2016) confirmaron que la diversidad de polinizadores constituye un componente determinante para mejorar el rendimiento agrícola en diferentes regiones del mundo.

La intensificación ecológica propone fortalecer los procesos naturales que sustentan la producción agrícola, reduciendo la dependencia de insumos externos y favoreciendo la sostenibilidad de los agroecosistemas. Dentro de este enfoque, la polinización representa uno de los servicios ecosistémicos de mayor importancia, ya que la conservación de comunidades diversas de insectos contribuye a incrementar el rendimiento de los cultivos mediante mecanismos biológicos naturales. Tamburini et al. (2020) sostienen que la producción agrícola del futuro requiere integrar la conservación de la biodiversidad con la seguridad alimentaria, mientras que IPBES (2016) reconoce que la protección de los polinizadores constituye una condición indispensable para garantizar sistemas agrícolas resilientes y sostenibles.

Aunque las abejas representan el grupo de polinizadores más estudiado, la polinización agrícola depende de una comunidad mucho más amplia de organismos. Rader et al. (2015) demostraron que moscas, mariposas, polillas, escarabajos y otros insectos participan activamente en la reproducción de numerosas especies vegetales, desempeñando funciones complementarias que fortalecen la estabilidad del servicio de polinización. De igual manera, Katumo et al. (2022) destacó que la conservación de las comunidades nativas de polinizadores resulta esencial para

mantener el funcionamiento de los ecosistemas y reducir la dependencia de especies manejadas dentro de los sistemas productivos.

La caracterización adecuada de estas comunidades requiere la aplicación de metodologías de muestreo que permitan registrar la mayor diversidad posible de organismos. Prendergast et al. (2020) señalan que la combinación de diferentes técnicas de captura incrementa la representatividad de los inventarios biológicos y reduce los sesgos asociados a la utilización de un único método. En este sentido, Dicks et al. (2021) destacan que la integración de transectos de observación, redes entomológicas y trampas de colores constituye una estrategia ampliamente aceptada para evaluar la riqueza, abundancia y composición taxonómica de los insectos polinizadores en agroecosistemas.

La estandarización de los procedimientos de muestreo adquiere especial importancia debido a que la actividad de los insectos varía según la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y el horario de observación. Tamburini et al. (2020) demostraron que estas condiciones ambientales modifican significativamente la actividad de forrajeo de los polinizadores, por lo que el control de estos factores resulta indispensable para realizar comparaciones confiables entre diferentes sistemas agrícolas. En consecuencia, la utilización de protocolos estandarizados permite obtener estimaciones más precisas de la diversidad de polinizadores y facilita la comparación de los resultados entre distintas investigaciones.

La productividad agrícola también debe evaluarse mediante indicadores que reflejen tanto la cantidad como la calidad de la producción obtenida. Además del rendimiento por unidad de superficie, variables como la formación de frutos, el peso promedio y la calidad comercial proporcionan una visión más completa del efecto que ejercen los servicios de polinización sobre el desempeño de los cultivos. Garibaldi et al. (2016) evidenciaron que una mayor diversidad de polinizadores incrementa simultáneamente el número de frutos producidos y diversos atributos de calidad, mientras que Dainese et al. (2019) señalaron que estos beneficios representan uno de los principales aportes de la biodiversidad al funcionamiento de los agroecosistemas.

En los últimos años se han desarrollado investigaciones orientadas a comprender la relación entre la diversidad de polinizadores y la productividad agrícola dentro de sistemas de producción diversificados. Garibaldi et al. (2016) destacaron que la conservación de comunidades diversas favorece el mantenimiento de los servicios ecosistémicos de polinización y contribuye al incremento del rendimiento de los cultivos. De manera similar, Dicks et al. (2021) señalaron la necesidad de fortalecer las investigaciones desarrolladas en diferentes contextos agroecológicos, debido a que las características climáticas, la composición del paisaje y las prácticas de manejo pueden modificar las relaciones existentes entre biodiversidad y productividad.

No obstante, los resultados obtenidos en distintas regiones no siempre pueden extrapolarse directamente a otros agroecosistemas. Las diferencias climáticas, la estructura del paisaje, el tipo de cultivos, las prácticas agronómicas y la composición de las comunidades de insectos condicionan el comportamiento de los servicios de polinización. Dicks et al. (2021) destacan que los efectos de la diversificación agrícola dependen tanto de las características locales como del contexto paisajístico, mientras que Dainese et al. (2019) subrayan la importancia de desarrollar investigaciones regionales que permitan comprender con mayor precisión la respuesta de la biodiversidad bajo diferentes condiciones de producción.

La diversificación agrícola puede implementarse mediante múltiples estrategias de manejo, entre ellas la incorporación de diversos cultivos, la conservación de cercas vivas, el establecimiento de franjas florales, el mantenimiento de vegetación espontánea y la protección de remanentes de hábitats naturales. Tamburini et al. (2020) demostraron que estas prácticas incrementan la disponibilidad de recursos alimenticios y de sitios de refugio para los polinizadores, mientras que Tamburini et al. (2020) señalan que también favorecen otros procesos ecológicos como el control biológico de plagas y la regulación ambiental. En consecuencia, la diversificación representa una estrategia capaz de integrar simultáneamente objetivos productivos y de conservación de la biodiversidad.

La conservación de los insectos polinizadores adquiere además una relevancia estratégica porque los agroecosistemas ocupan extensas superficies del territorio y, por tanto, desempeñan un papel fundamental en el mantenimiento de la biodiversidad. IPBES (2016) señala que la protección de estos organismos no puede limitarse exclusivamente a las

áreas naturales protegidas, sino que debe incorporarse dentro de las prácticas habituales de manejo agrícola para garantizar la continuidad de los servicios ecosistémicos. En concordancia con este planteamiento, Dainese et al. (2019) destacan que la integración de criterios ecológicos en la planificación de los sistemas productivos contribuye simultáneamente a fortalecer la biodiversidad y mejorar la productividad agrícola.

La diversidad de insectos polinizadores también representa un mecanismo de estabilidad ecológica frente a las perturbaciones ambientales. Potts et al. (2016) sostienen que la creciente dependencia de numerosos cultivos respecto a la polinización animal convierte a estos organismos en un componente estratégico para la seguridad alimentaria mundial. Asimismo, Garibaldi et al. (2016) demostraron que las comunidades diversas de polinizadores incrementan la estabilidad y eficiencia del servicio de polinización, mientras que Dainese et al. (2019) evidenciaron que la biodiversidad funcional permite mantener niveles elevados de producción incluso bajo condiciones ambientales cambiantes.

La evaluación simultánea de los componentes ecológicos y productivos constituye una herramienta indispensable para comprender las relaciones existentes entre biodiversidad y agricultura. Dicks et al. (2021) señalan que el análisis conjunto de la riqueza, abundancia y diversidad de polinizadores con variables relacionadas con el rendimiento agrícola permite comprender con mayor precisión el funcionamiento de los agroecosistemas. De forma complementaria, Dainese et al. (2019) destacan que la utilización integrada de indicadores ecológicos y productivos proporciona información más robusta para orientar estrategias de manejo sustentadas en evidencia científica.

A pesar del importante avance alcanzado por la investigación sobre polinización durante las últimas décadas, aún persisten vacíos de conocimiento relacionados con la respuesta de las comunidades de insectos polinizadores frente a diferentes niveles de diversificación agrícola y con la magnitud de su influencia sobre múltiples indicadores de productividad. Garibaldi et al. (2016) señalan que todavía existe una limitada comprensión de estas relaciones en diversos contextos productivos, mientras que Dicks et al. (2021) destacan la necesidad de desarrollar investigaciones que integren simultáneamente la diversidad de polinizadores, las características estructurales del agroecosistema y las variables de productividad agrícola.

Asimismo, resulta necesario profundizar en el conocimiento de la manera en que la complejidad estructural de los agroecosistemas influye sobre la diversidad de insectos polinizadores y sobre la productividad agrícola. Dicks et al. (2021) demostraron que las características del paisaje condicionan significativamente la composición de las comunidades de polinizadores, mientras que Tamburini et al. (2020) sostienen que la intensificación ecológica requiere comprender las interacciones entre biodiversidad, manejo agrícola y producción para desarrollar sistemas agrícolas más sostenibles. En este contexto, generar evidencia científica que integre estos componentes permitirá fortalecer las estrategias orientadas a incrementar simultáneamente la productividad y la conservación de la biodiversidad.

En este contexto, la presente investigación plantea la siguiente pregunta: ¿cuál es la relación entre la diversidad de insectos polinizadores y la productividad de sistemas agrícolas con diferentes niveles de diversificación?

En correspondencia con esta interrogante, el objetivo general fue evaluar la diversidad de insectos polinizadores y determinar su relación con la productividad de sistemas agrícolas con diferentes niveles de diversificación mediante el análisis de la riqueza, abundancia, índices ecológicos y variables productivas.

Como objetivos específicos se establecieron: caracterizar la riqueza y composición taxonómica de los insectos polinizadores registrados en los sistemas agrícolas; comparar la abundancia y diversidad entre unidades productivas con baja, media y alta diversificación; determinar las diferencias de productividad agrícola entre los sistemas evaluados; analizar las relaciones existentes entre la riqueza, abundancia y diversidad de polinizadores con el rendimiento, la formación de frutos, el peso promedio y la calidad comercial de la producción; e identificar los componentes de la diversificación agrícola asociados con una mayor presencia de insectos polinizadores.

Finalmente, se planteó como hipótesis que los sistemas agrícolas con mayor diversificación presentan comunidades de insectos polinizadores significativamente más ricas, abundantes y diversas, y que el incremento de estos indicadores ecológicos se relaciona positivamente con una mayor productividad, formación de frutos y calidad comercial de los cultivos.

2. METODOLOGÍA

Enfoque y diseño de la investigación

La investigación se desarrolló mediante un enfoque cuantitativo, con un diseño observacional, comparativo, correlacional y transversal, orientado a evaluar la diversidad de insectos polinizadores y determinar su relación con la productividad de sistemas agrícolas con diferentes niveles de diversificación. El enfoque cuantitativo permitió obtener información objetiva y medible sobre la riqueza y abundancia de polinizadores, los índices ecológicos de diversidad y los principales indicadores de productividad agrícola, facilitando la comparación entre las unidades productivas evaluadas y el análisis estadístico de las asociaciones existentes entre las variables ecológicas y productivas. Dicks et al. (2021) señalan que este tipo de aproximación metodológica resulta adecuada para analizar la respuesta de las comunidades de polinizadores frente a diferentes condiciones de manejo agrícola, mientras que Dainese et al. (2019) destacan su utilidad para estudiar la relación entre biodiversidad y productividad en los agroecosistemas.

El diseño observacional respondió a que las unidades productivas fueron evaluadas bajo sus condiciones habituales de manejo, sin modificar experimentalmente la estructura de los cultivos ni las comunidades de insectos presentes. Esta estrategia permitió analizar los patrones naturales de distribución y diversidad de los polinizadores dentro de agroecosistemas con distintos niveles de complejidad estructural. El componente comparativo facilitó establecer diferencias entre sistemas con baja, media y alta diversificación agrícola, mientras que el componente correlacional permitió evaluar la relación existente entre la diversidad de polinizadores y variables productivas como el rendimiento, la formación de frutos, el peso promedio y la calidad comercial de la producción, siguiendo el enfoque empleado en investigaciones desarrolladas por Tamburini et al. (2020) y Garibaldi et al. (2016).

El carácter transversal del estudio estuvo determinado porque toda la información fue recopilada durante un único período agrícola correspondiente a la floración de los cultivos seleccionados. Este diseño permitió obtener una visión integral de las condiciones ecológicas y productivas presentes durante el período de evaluación, constituyendo una estrategia ampliamente utilizada en investigaciones orientadas a caracterizar comunidades de polinizadores dentro de paisajes agrícolas (Holzschuh et al., 2007). Asimismo, Dicks et al. (2021) señalan que la estandarización temporal del muestreo favorece la comparabilidad de los resultados entre diferentes sistemas agrícolas y reduce la variabilidad asociada a las fluctuaciones estacionales de las comunidades de insectos.

Unidades productivas evaluadas

El estudio se desarrolló en 18 unidades productivas agrícolas seleccionadas por presentar diferentes niveles de diversificación estructural. Con el propósito de analizar la influencia de la complejidad del agroecosistema sobre las comunidades de insectos polinizadores y la productividad agrícola, las unidades fueron clasificadas en tres categorías: seis sistemas con baja diversificación, seis con diversificación media y seis con alta diversificación. Esta distribución permitió establecer grupos comparables para evaluar las diferencias ecológicas y productivas asociadas con cada nivel de diversificación, siguiendo criterios utilizados en investigaciones sobre ecología del paisaje y biodiversidad agrícola (Kennedy et al., 2013).

La clasificación de las unidades productivas se realizó considerando diversos componentes estructurales del paisaje agrícola, entre ellos el número de cultivos presentes, la cobertura de vegetación espontánea, la existencia de cercas vivas, la presencia de árboles o arbustos dispersos, la disponibilidad de franjas florales y la conservación de remanentes de hábitats naturales. Tamburini et al. (2020) señalan que estos elementos incrementan la disponibilidad de alimento, refugio y sitios de reproducción para los insectos polinizadores, mientras que Dainese et al. (2019) destacan que la heterogeneidad estructural favorece el mantenimiento de comunidades biológicamente más diversas y funcionalmente estables.

Los sistemas de baja diversificación estuvieron caracterizados por el predominio de uno o dos cultivos principales, escasa vegetación en los bordes de las parcelas, ausencia de cercas vivas y limitada disponibilidad de recursos florales fuera del cultivo dominante. En contraste, los sistemas con diversificación media presentaron entre tres y cinco

cultivos, una cobertura vegetal intermedia y presencia parcial de árboles, arbustos y vegetación espontánea. Finalmente, los sistemas altamente diversificados se caracterizaron por la presencia de más de cinco cultivos, cercas vivas consolidadas, árboles dispersos, franjas florales y abundante vegetación espontánea, proporcionando una mayor continuidad espacial y temporal de recursos para las comunidades de polinizadores. Tamburini et al. (2020) sostienen que este tipo de estructura incrementa la heterogeneidad ambiental y favorece la conservación de la biodiversidad funcional dentro de los agroecosistemas, condición respaldada también por Garibaldi et al. (2016) y Dicks et al. (2021).

Criterios de clasificación de la diversificación agrícola

El estudio se desarrolló en 18 unidades productivas agrícolas seleccionadas por presentar diferentes niveles de diversificación estructural. Con el propósito de analizar la influencia de la complejidad del agroecosistema sobre las comunidades de insectos polinizadores y la productividad agrícola, las unidades fueron clasificadas en tres categorías: seis sistemas con baja diversificación, seis con diversificación media y seis con alta diversificación. Esta distribución permitió establecer grupos comparables para evaluar las diferencias ecológicas y productivas asociadas con cada nivel de diversificación, siguiendo criterios utilizados en investigaciones sobre ecología del paisaje y biodiversidad agrícola (Kennedy et al., 2013).

La clasificación de las unidades productivas se realizó considerando diversos componentes estructurales del paisaje agrícola, entre ellos el número de cultivos presentes, la cobertura de vegetación espontánea, la existencia de cercas vivas, la presencia de árboles o arbustos dispersos, la disponibilidad de franjas florales y la conservación de remanentes de hábitats naturales. Tamburini et al. (2020) señalan que estos elementos incrementan la disponibilidad de alimento, refugio y sitios de reproducción para los insectos polinizadores, mientras que Dainese et al. (2019) destacan que la heterogeneidad estructural favorece el mantenimiento de comunidades biológicamente más diversas y funcionalmente estables.

Los sistemas de baja diversificación estuvieron caracterizados por el predominio de uno o dos cultivos principales, escasa vegetación en los bordes de las parcelas, ausencia de cercas vivas y limitada disponibilidad de recursos florales fuera del cultivo dominante. En contraste, los sistemas con diversificación media presentaron entre tres y cinco cultivos, una cobertura vegetal intermedia y presencia parcial de árboles, arbustos y vegetación espontánea. Finalmente, los sistemas altamente diversificados se caracterizaron por la presencia de más de cinco cultivos, cercas vivas consolidadas, árboles dispersos, franjas florales y abundante vegetación espontánea, proporcionando una mayor continuidad espacial y temporal de recursos para las comunidades de polinizadores. Tamburini et al. (2020) sostienen que este tipo de estructura incrementa la heterogeneidad ambiental y favorece la conservación de la biodiversidad funcional dentro de los agroecosistemas, condición respaldada también por Garibaldi et al. (2016) y Dicks et al. (2021).

Tabla 1.

Criterios para clasificar el nivel de diversificación agrícola

Indicador	Baja diversificación	Diversificación media	Alta diversificación
Número de cultivos	1–2 cultivos	3–5 cultivos	Más de 5 cultivos
Vegetación espontánea	Escasa	Moderada	Abundante
Cercas vivas	Ausentes	Parciales	Frecuentes
Árboles o arbustos	Escasos	Moderados	Abundantes
Recursos florales	Temporales y reducidos	Moderados	Continuos y diversos

Nota. Criterios utilizados para clasificar las unidades productivas según el grado de diversificación agrícola considerado en la investigación. Elaboración propia a partir de los criterios metodológicos descritos por Dicks et al. (2021), Tamburini et al. (2020) y Tamburini et al. (2020).

Muestreo de insectos polinizadores

El muestreo de los insectos polinizadores se realizó durante el período de máxima floración de los cultivos predominantes en las unidades productivas seleccionadas. Se desarrollaron doce jornadas de muestreo distribuidas a lo largo del ciclo de floración con el propósito de registrar la mayor variabilidad posible de especies y minimizar el

efecto de las fluctuaciones temporales propias de las comunidades de insectos. Todas las evaluaciones fueron efectuadas bajo condiciones climáticas favorables, evitando precipitaciones intensas, vientos fuertes o temperaturas extremas que pudieran alterar la actividad de forrajeo de los polinizadores. Tamburini et al. (2020) señalan que estas condiciones ambientales influyen directamente sobre la actividad de los insectos, por lo que su control mejora la comparabilidad entre unidades de estudio.

Con el fin de obtener un inventario representativo de la comunidad de polinizadores, se combinaron tres técnicas complementarias de muestreo: transectos de observación directa, captura mediante red entomológica y trampas de colores. Dicks et al. (2021) destacan que la utilización conjunta de diferentes métodos incrementa la probabilidad de registrar grupos taxonómicos con distintos patrones de comportamiento y reduce los sesgos asociados al empleo de una única técnica. Asimismo, Prendergast et al. (2020) indican que esta estrategia proporciona una caracterización más completa de la riqueza y composición de las comunidades presentes en los agroecosistemas.

Transectos de observación

Los transectos de observación constituyeron la técnica principal para registrar la actividad de los insectos polinizadores sobre las flores presentes en cada unidad productiva. En cada sistema agrícola se establecieron transectos lineales de 100 m de longitud, recorridos a velocidad constante dentro de una franja de observación de dos metros a cada lado del recorrido. Se consideró como polinizador potencial a todo insecto que estableciera contacto directo con las estructuras reproductivas de las flores, permitiendo registrar la riqueza de especies, la abundancia de individuos y el comportamiento de visita floral, conforme a las recomendaciones metodológicas descritas por Dicks et al. (2021).

Cada transecto fue evaluado durante 30 minutos, preferentemente entre las 08:00 y las 12:00 horas, intervalo en el que la mayoría de los polinizadores presenta mayor actividad de forrajeo. Durante cada recorrido se registró el grupo taxonómico observado, la especie vegetal visitada, el comportamiento de visita y el número de individuos registrados. La estandarización del horario y del tiempo de observación permitió reducir la variabilidad asociada a los patrones diarios de actividad de los insectos y mejorar la comparación entre las unidades productivas, tal como sugieren Tamburini et al. (2020) y Prendergast et al. (2020).

Captura con red entomológica

La captura con red entomológica se utilizó como técnica complementaria para recolectar ejemplares cuya identificación taxonómica requería un examen detallado en laboratorio. Las capturas se realizaron dentro de las mismas áreas evaluadas mediante transectos, evitando la duplicación de registros observacionales. Cada ejemplar fue preservado y etiquetado con información correspondiente a la unidad productiva, fecha, hora de captura y especie vegetal visitada, garantizando la trazabilidad de la información obtenida durante el trabajo de campo.

Posteriormente, los especímenes fueron identificados mediante claves taxonómicas especializadas y literatura entomológica. Siempre que fue posible, la identificación alcanzó el nivel de especie; cuando las características del material biológico no lo permitieron, se realizó hasta género o familia. Rader et al. (2015) destacan que la captura directa constituye un procedimiento indispensable para la correcta identificación de numerosos grupos de polinizadores que no pueden diferenciarse únicamente mediante observación en campo.

Trampas de colores

Las trampas de colores se emplearon como una técnica complementaria destinada a capturar insectos atraídos por estímulos visuales. En cada unidad productiva se instalaron trampas amarillas, azules y blancas, distribuidas homogéneamente dentro del área de estudio y mantenidas activas durante seis horas en cada jornada de muestreo. Este procedimiento permitió registrar organismos cuya actividad pudiera pasar inadvertida durante las observaciones directas.

Finalizado el período de exposición, los ejemplares capturados fueron preservados e incorporados al proceso de identificación taxonómica. Dicks et al. (2021) señalan que la combinación de trampas de distintos colores incrementa la probabilidad de capturar grupos funcionales con diferentes preferencias visuales, mientras que Prendergast et al.

(2020) destacan que la integración de este método con observaciones directas y capturas activas mejora significativamente la representatividad del inventario biológico.

Identificación taxonómica

La identificación taxonómica de los insectos polinizadores se realizó mediante el empleo de claves especializadas, comparación con colecciones de referencia y revisión de literatura entomológica correspondiente a los principales grupos registrados durante el estudio. Los ejemplares fueron clasificados hasta el nivel taxonómico más preciso posible, alcanzando en la mayoría de los casos la categoría de especie y, cuando las condiciones del material biológico no lo permitieron, los niveles de género o familia.

Los principales órdenes identificados correspondieron a Hymenoptera, Diptera, Lepidoptera y Coleoptera, grupos ampliamente reconocidos por su contribución a los procesos de polinización tanto en ecosistemas naturales como agrícolas (Ollerton et al., 2011). Posteriormente, todos los registros fueron revisados para detectar posibles inconsistencias taxonómicas y uniformar la nomenclatura científica utilizada en la base de datos. Finalmente, cada ejemplar fue asociado con la unidad productiva, el nivel de diversificación agrícola y el método de muestreo correspondiente, permitiendo disponer de una base de datos estructurada para el cálculo de los indicadores ecológicos y el desarrollo de los análisis estadísticos posteriores, conforme a los criterios empleados por Dicks et al. (2021) y Dainese et al. (2019).

Indicadores de diversidad de polinizadores

La diversidad de insectos polinizadores fue evaluada mediante indicadores ecológicos ampliamente utilizados en estudios de biodiversidad: riqueza específica, abundancia total, índice de diversidad de Shannon-Wiener, índice de Simpson y equidad de Pielou. La utilización conjunta de estos parámetros permitió caracterizar de manera integral la estructura de las comunidades presentes en los diferentes sistemas agrícolas, considerando no solo el número de especies registradas, sino también la distribución relativa de los individuos y el grado de uniformidad de las poblaciones (Magurran, 2004).

La riqueza específica fue definida como el número total de especies o morfoespecies registradas en cada unidad productiva, mientras que la abundancia correspondió al número total de individuos observados durante el período de muestreo. Tamburini et al. (2020) señalan que estos indicadores constituyen medidas básicas para describir la composición de las comunidades biológicas y comparar diferentes sistemas de producción.

Con el propósito de obtener una caracterización más completa de la diversidad, se calcularon los índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou. El índice de Shannon-Wiener integró simultáneamente la riqueza y la abundancia relativa de las especies; el índice de Simpson permitió evaluar el grado de dominancia de determinadas especies, mientras que la equidad de Pielou proporcionó información sobre la uniformidad en la distribución de los individuos entre las especies registradas. Roswell et al. (2021) destacan que la utilización conjunta de estos índices constituye una práctica ampliamente aceptada para comparar comunidades ecológicas y analizar su respuesta frente a diferentes condiciones ambientales y de manejo.

Evaluación de la productividad agrícola

La productividad agrícola fue evaluada mediante cuatro indicadores: rendimiento por hectárea, porcentaje de frutos formados, peso promedio de los frutos y proporción de frutos comercializables. Garibaldi et al. (2016) señalan que los beneficios derivados de la polinización no se reflejan únicamente en el incremento del rendimiento, sino también en diferentes atributos relacionados con la calidad de la producción. Posteriormente, Dainese et al. (2019) demostraron que la diversidad de organismos responsables de los servicios ecosistémicos influye simultáneamente sobre diversos componentes de la productividad agrícola. En consecuencia, la selección de estas variables permitió valorar tanto la cantidad como la calidad de la producción obtenida en las diferentes unidades agrícolas.

El rendimiento fue expresado en toneladas por hectárea, mientras que el porcentaje de frutos formados se determinó mediante la relación entre el número de flores previamente marcadas y la cantidad de frutos desarrollados al finalizar

el proceso de fructificación. Potts et al. (2016) utilizaron este tipo de indicadores para evaluar la influencia de la polinización sobre el éxito reproductivo de diferentes cultivos. En cada unidad productiva se seleccionaron plantas representativas para realizar el seguimiento del desarrollo reproductivo durante todo el período de floración.

El peso promedio de los frutos fue determinado mediante el pesaje de una muestra representativa obtenida durante la cosecha. Posteriormente se calculó la proporción de frutos comercializables considerando únicamente aquellos que cumplieron los criterios de tamaño, forma, sanidad y ausencia de daños visibles establecidos para su comercialización. Garibaldi et al. (2016) destacan que estos indicadores permiten valorar con mayor precisión la contribución de la diversidad de polinizadores sobre el desempeño económico de los sistemas agrícolas.

Variables del estudio

La variable independiente principal correspondió al nivel de diversificación agrícola, clasificado en tres categorías: baja, media y alta diversificación. Dicks et al. (2021) señalan que la heterogeneidad estructural del paisaje constituye uno de los principales factores que condicionan la riqueza y abundancia de los polinizadores, razón por la cual el nivel de diversificación fue considerado el principal factor de comparación entre las unidades productivas.

Las variables dependientes ecológicas estuvieron conformadas por la riqueza de especies, la abundancia total de individuos, el índice de Shannon-Wiener, el índice de Simpson y la equidad de Pielou. Por otra parte, las variables dependientes productivas incluyeron el rendimiento agrícola, el porcentaje de frutos formados, el peso promedio de los frutos y la proporción de frutos comercializables. Garibaldi et al. (2016) demostraron que estos indicadores permiten analizar de manera integral la influencia de los polinizadores sobre la productividad agrícola, mientras que Dainese et al. (2019) destacan que su evaluación conjunta facilita comprender la relación existente entre biodiversidad y producción.

Además, se registraron variables descriptivas relacionadas con el número de cultivos presentes, la cobertura de vegetación espontánea, la presencia de cercas vivas, la disponibilidad de recursos florales y la existencia de árboles o arbustos. Tamburini et al. (2020) destacan que estos componentes incrementan la heterogeneidad del paisaje y favorecen la conservación de los polinizadores. En la misma línea, Dicks et al. (2021) demostraron que estas características estructurales contribuyen significativamente a explicar las diferencias observadas en la diversidad de insectos entre distintos sistemas agrícolas.

Organización y procesamiento de datos

La información obtenida durante las jornadas de muestreo fue registrada inicialmente en fichas de campo diseñadas para estandarizar la recolección de datos y minimizar posibles errores durante el trabajo de investigación. Posteriormente, todos los registros fueron incorporados a una base de datos electrónica, donde se efectuó un proceso de revisión y depuración orientado a identificar inconsistencias taxonómicas, registros duplicados y errores de transcripción, garantizando la calidad de la información antes del análisis estadístico (Kennedy et al., 2013).

Los datos correspondientes a los insectos polinizadores fueron organizados considerando la unidad productiva evaluada, el nivel de diversificación agrícola, el método de muestreo utilizado y la clasificación taxonómica alcanzada para cada ejemplar. Paralelamente, la información referente a la productividad agrícola fue estructurada según la unidad productiva y el cultivo evaluado. Finalmente, ambas bases de datos fueron integradas en una única matriz analítica que permitió relacionar los indicadores ecológicos con las variables productivas y desarrollar los análisis comparativos y correlacionales propuestos para la investigación (Dainese et al., 2019).

Análisis estadístico

El análisis estadístico comenzó con la obtención de estadísticos descriptivos, incluyendo media, desviación estándar, valores mínimos y máximos para cada una de las variables evaluadas. Estas medidas permitieron caracterizar la distribución general de los indicadores ecológicos y productivos registrados en los diferentes niveles de diversificación agrícola. Posteriormente, se verificó el cumplimiento de los supuestos requeridos para la aplicación de pruebas paramétricas mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianzas de Levene.

Dicks et al. (2021) destacan que la comprobación previa de estos supuestos resulta indispensable para garantizar la validez de las comparaciones estadísticas en investigaciones relacionadas con biodiversidad y agroecosistemas.

Una vez comprobado el cumplimiento de los supuestos estadísticos, se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para comparar los indicadores de diversidad de polinizadores y productividad agrícola entre los tres niveles de diversificación. Cuando se identificaron diferencias estadísticamente significativas, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de significancia de $p < 0,05$. Garibaldi et al. (2016) emplearon procedimientos comparativos similares para analizar las diferencias en la productividad de cultivos asociadas con la diversidad de polinizadores, mientras que Dainese et al. (2019) utilizaron este tipo de análisis para evaluar la contribución de la biodiversidad a distintos componentes de la producción agrícola.

La relación entre la diversidad de insectos polinizadores y la productividad agrícola fue evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, con el propósito de determinar la intensidad y dirección de la asociación existente entre las variables ecológicas y productivas. Posteriormente, se desarrollaron modelos de regresión lineal simple para estimar la capacidad explicativa de la riqueza de especies, la abundancia de individuos y el índice de Shannon-Wiener sobre variables como el rendimiento agrícola y el porcentaje de frutos formados. Dainese et al. (2019) señalan que este tipo de modelos permite cuantificar la influencia relativa de la biodiversidad sobre la productividad, proporcionando una base objetiva para interpretar las relaciones observadas en los agroecosistemas.

Hipótesis estadísticas

Con el propósito de evaluar la influencia del nivel de diversificación agrícola sobre la diversidad de insectos polinizadores y la productividad de los sistemas agrícolas, se plantearon hipótesis para los análisis comparativos y correlacionales.

Para el análisis de comparación entre grupos, la hipótesis nula (H_0) estableció que no existen diferencias estadísticamente significativas en la diversidad de insectos polinizadores ni en los indicadores de productividad agrícola entre los sistemas con baja, media y alta diversificación. En contraste, la hipótesis alternativa (H_1) planteó que al menos uno de los niveles de diversificación presenta diferencias significativas respecto de los demás, evidenciando que la complejidad estructural del agroecosistema influye sobre la biodiversidad y el desempeño productivo.

En el análisis de asociación entre variables ecológicas y productivas, la hipótesis nula (H_0) estableció que no existe una relación estadísticamente significativa entre los indicadores de diversidad de polinizadores y las variables de productividad agrícola. La hipótesis alternativa (H_1) propuso que la riqueza, abundancia y diversidad de insectos polinizadores se relacionan positiva y significativamente con el rendimiento agrícola, la formación de frutos, el peso promedio y la proporción de frutos comercializables.

Consideraciones éticas y ambientales

La investigación fue desarrollada siguiendo criterios éticos y ambientales orientados a minimizar el impacto sobre las comunidades de insectos polinizadores y sobre los agroecosistemas evaluados. Siempre que fue posible, se priorizaron los registros obtenidos mediante observación directa, limitando la captura de ejemplares únicamente a aquellos necesarios para su identificación taxonómica. IPBES (2016) recomienda reducir al mínimo la intervención sobre las poblaciones naturales durante las investigaciones relacionadas con biodiversidad, con el fin de disminuir las alteraciones ocasionadas por las actividades de muestreo.

Todas las unidades productivas fueron evaluadas con la autorización previa de sus propietarios, quienes fueron informados acerca de los objetivos de la investigación y de los procedimientos empleados durante el trabajo de campo. La información obtenida fue utilizada exclusivamente con fines científicos y tratada con estricta confidencialidad, garantizando la protección de los datos proporcionados por los participantes.

La investigación estuvo orientada a generar evidencia científica que contribuya al diseño de estrategias de manejo agrícola compatibles con la conservación de la biodiversidad y el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos de polinización. Garibaldi et al. (2016) demostraron que la conservación de los polinizadores favorece simultáneamente

la productividad agrícola y la sostenibilidad de los agroecosistemas, mientras que FAO (s. f.) destaca la necesidad de promover prácticas agrícolas capaces de incrementar la producción preservando la biodiversidad y los procesos ecológicos que la sustentan.

3. RESULTADOS

Caracterización de los sistemas agrícolas evaluados

La evaluación de las 18 unidades productivas evidenció diferencias estructurales claramente definidas entre los tres niveles de diversificación agrícola. Los sistemas altamente diversificados presentaron una mayor complejidad del paisaje, caracterizada por la presencia simultánea de múltiples cultivos, abundante vegetación espontánea, cercas vivas, árboles dispersos y una disponibilidad continua de recursos florales. En contraste, los sistemas de baja diversificación estuvieron dominados por uno o dos cultivos principales y mostraron escasa cobertura vegetal, limitada presencia de elementos seminaturales y reducida oferta de recursos para los insectos polinizadores.

Dicks et al. (2021) señalan que la heterogeneidad estructural del paisaje constituye uno de los principales factores asociados con la conservación de comunidades diversas de polinizadores. En concordancia con este planteamiento, Tamburini et al. (2020) destacan que la presencia de diferentes componentes del paisaje agrícola incrementa la disponibilidad de recursos para numerosos grupos de insectos beneficiosos.

El índice de diversificación confirmó diferencias estadísticamente significativas entre las tres categorías evaluadas ($F = 68,42$; $p < 0,001$), demostrando que la clasificación establecida permitió diferenciar adecuadamente los niveles de complejidad estructural de los agroecosistemas. Estos resultados respaldan la utilización del nivel de diversificación como variable de comparación para el análisis de la diversidad de polinizadores y de los indicadores de productividad agrícola.

Tabla 2.

Características generales de los sistemas agrícolas según nivel de diversificación

Indicador	Baja diversificación	Diversificación media	Alta diversificación
Número promedio de cultivos	1,8 ± 0,4	4,2 ± 0,8	7,8 ± 1,3
Cobertura vegetal (%)	18,6 ± 5,4	37,8 ± 7,2	62,5 ± 8,6
Unidades con cercas vivas	1	4	6
Árboles y arbustos por unidad	8,3 ± 3,7	24,5 ± 7,8	48,7 ± 12,3
Recursos florales disponibles	Bajos	Moderados	Altos
Índice de diversificación	6,8 ± 1,2	10,7 ± 1,4	14,2 ± 0,8

Nota. Elaboración propia a partir de la caracterización de los sistemas agrícolas evaluados según su nivel de diversificación.

Composición general de la comunidad de insectos polinizadores

Durante las doce jornadas de muestreo se registraron 3.846 individuos pertenecientes a 96 especies o morfoespecies, distribuidas en 54 géneros, 22 familias y cuatro órdenes de insectos polinizadores. Estos resultados evidencian una elevada diversidad taxonómica dentro de los sistemas agrícolas evaluados y ponen de manifiesto la capacidad de los agroecosistemas para albergar comunidades biológicas complejas cuando mantienen condiciones favorables para la disponibilidad de recursos florales y la conservación de hábitats. IPBES (2016) reconoce que la diversidad de polinizadores constituye un componente esencial para el funcionamiento de los agroecosistemas y para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos asociados a la producción agrícola.

El orden Hymenoptera fue el grupo predominante tanto en riqueza de especies como en abundancia de individuos, seguido por Diptera, Lepidoptera y Coleoptera. Rader et al. (2015) señalan que las abejas y otros himenópteros representan los principales agentes de polinización en la mayoría de los ecosistemas agrícolas; sin embargo, destacan

que otros grupos taxonómicos también desempeñan funciones complementarias que contribuyen a la estabilidad del proceso de polinización. En concordancia con estos planteamientos, la composición observada en la presente investigación evidencia que el servicio de polinización estuvo sustentado por una comunidad funcionalmente diversa y no exclusivamente por un único grupo de insectos.

La elevada representación de diferentes órdenes taxonómicos indica que los sistemas agrícolas evaluados proporcionaron condiciones adecuadas para el establecimiento de múltiples grupos funcionales de polinizadores. Dainese et al. (2019) demostraron que la diversidad de organismos responsables de los servicios ecosistémicos incrementa la resiliencia de los agroecosistemas y favorece procesos ecológicos más estables, mientras que Garibaldi et al. (2016) señalaron que la participación simultánea de diferentes especies mejora la eficiencia de la polinización y fortalece la productividad agrícola. En este sentido, la composición taxonómica registrada constituye una base importante para comprender las relaciones observadas posteriormente entre diversidad de polinizadores y desempeño productivo.

Tabla 3.

Composición taxonómica general de los insectos polinizadores registrados

Orden	Número de familias	Número de especies	Número de individuos	Abundancia relativa (%)
Hymenoptera	9	52	2.287	59,5
Diptera	6	21	796	20,7
Lepidoptera	4	15	478	12,4
Coleoptera	3	8	285	7,4
Total	22	96	3.846	100,0

Nota. Elaboración propia a partir de los registros taxonómicos de los 3.846 individuos recolectados durante las jornadas de muestreo.

Abundancia de polinizadores según nivel de diversificación

La abundancia total de insectos polinizadores presentó un incremento progresivo conforme aumentó el nivel de diversificación agrícola. Los sistemas altamente diversificados registraron el mayor número de individuos, seguidos por los sistemas con diversificación media, mientras que las unidades de baja diversificación presentaron las menores abundancias. Este comportamiento evidencia que la mayor complejidad estructural del agroecosistema favorece el establecimiento de comunidades más numerosas de insectos polinizadores.

Dicks et al. (2021) demostraron que la disponibilidad de recursos florales, la presencia de vegetación seminatural y la heterogeneidad del paisaje incrementan significativamente la abundancia de abejas silvestres dentro de los sistemas agrícolas. De manera similar, Tamburini et al. (2020) señalan que los agroecosistemas diversificados ofrecen una mayor continuidad de alimento, refugio y sitios de reproducción, condiciones que favorecen la permanencia de poblaciones abundantes de organismos polinizadores. Los resultados obtenidos en la presente investigación siguen este mismo patrón, evidenciando un incremento sostenido de la abundancia conforme aumentó el nivel de diversificación agrícola. El análisis de varianza confirmó diferencias estadísticamente significativas entre las tres categorías evaluadas ($F = 42,76$; $p < 0,001$). Asimismo, las comparaciones múltiples mediante la prueba de Tukey evidenciaron diferencias significativas entre los sistemas de baja y alta diversificación, entre los sistemas de diversificación media y alta, y entre los sistemas de baja y media diversificación. Estos resultados indican que el incremento de la complejidad estructural del paisaje estuvo acompañado por un aumento gradual de la abundancia de polinizadores.

La mayor abundancia registrada en los sistemas altamente diversificados sugiere que la incorporación de múltiples cultivos, vegetación espontánea, árboles y cercas vivas incrementa la disponibilidad de recursos durante diferentes períodos del ciclo agrícola. Garibaldi et al. (2016) destacan que el mantenimiento de comunidades abundantes y diversas de polinizadores fortalece los servicios ecosistémicos de polinización y contribuye al incremento del rendimiento agrícola, mientras que Dainese et al. (2019) señalan que la biodiversidad funcional constituye uno de los principales factores asociados con la sostenibilidad de los agroecosistemas.

Tabla 4.

Abundancia de insectos polinizadores según nivel de diversificación agrícola

Nivel de diversificación	Número de unidades	Abundancia total	Promedio por unidad	Desviación estándar
Baja	6	846	141,0	22,8
Media	6	1.217	202,8	28,6
Alta	6	1.783	297,2	35,4
Total	18	3.846	213,7	70,4

Nota. Elaboración propia a partir de los registros de abundancia de insectos polinizadores obtenidos en las unidades productivas de baja, media y alta diversificación.

Riqueza de especies de insectos polinizadores

La riqueza de especies presentó un incremento progresivo conforme aumentó el nivel de diversificación agrícola. Los sistemas altamente diversificados albergaron el mayor número de especies de insectos polinizadores, mientras que los sistemas con baja diversificación registraron la menor riqueza específica. Este comportamiento evidencia que la complejidad estructural del agroecosistema favorece la conservación de comunidades biológicamente más diversas y confirma la influencia positiva de la heterogeneidad del paisaje sobre la biodiversidad funcional.

Dicks et al. (2021) demostraron que la disponibilidad de hábitats seminaturales y de recursos florales continuos constituye uno de los principales factores que explican el incremento de la riqueza de abejas silvestres en los agroecosistemas. De forma similar, Tamburini et al. (2020) sostienen que los sistemas agrícolas estructuralmente complejos ofrecen una mayor variedad de nichos ecológicos, permitiendo la coexistencia de especies con diferentes requerimientos biológicos y fortaleciendo la estabilidad de las comunidades de polinizadores.

El análisis de varianza confirmó diferencias estadísticamente significativas entre los tres niveles de diversificación ($F = 51,38$; $p < 0,001$). Las comparaciones posteriores evidenciaron que los sistemas altamente diversificados presentaron una riqueza significativamente superior a la observada en las unidades de baja y media diversificación. Este patrón coincide con lo reportado por Garibaldi et al. (2016), quienes señalaron que la diversidad de polinizadores aumenta conforme se incrementa la heterogeneidad del paisaje agrícola y la disponibilidad de recursos para los insectos.

Los resultados obtenidos indican que la diversificación agrícola favorece no solo el incremento del número de individuos, sino también la incorporación de nuevas especies dentro de los agroecosistemas. Dainese et al. (2019) destacan que las comunidades con mayor riqueza específica presentan una mayor capacidad para mantener los servicios ecosistémicos frente a perturbaciones ambientales, debido a la complementariedad funcional existente entre las diferentes especies de polinizadores.

Tabla 5.

Riqueza de insectos polinizadores según nivel de diversificación agrícola

Nivel de diversificación	Riqueza promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Baja	29,7	4,9	23	36
Media	44,8	5,7	37	52
Alta	61,3	6,2	53	70

Nota. Elaboración propia a partir de la riqueza de especies registrada en las unidades productivas correspondientes a cada nivel de diversificación agrícola.

Diversidad ecológica de las comunidades de polinizadores

Los índices ecológicos evidenciaron diferencias significativas en la estructura de las comunidades de insectos polinizadores entre los tres niveles de diversificación agrícola. Los sistemas altamente diversificados registraron los valores más elevados en los índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou, indicando comunidades

caracterizadas por una mayor diversidad, menor dominancia de unas pocas especies y una distribución más uniforme de los individuos.

Roswell et al. (2021) señala que el índice de Shannon-Wiener constituye uno de los indicadores más robustos para evaluar simultáneamente la riqueza y la abundancia relativa de las especies, mientras que Roswell et al. (2021) destacan que la utilización conjunta de diferentes índices ecológicos proporciona una caracterización más completa de la estructura de las comunidades biológicas. En concordancia con estos planteamientos, los resultados obtenidos evidencian que la diversificación agrícola favoreció comunidades ecológicamente más equilibradas y funcionalmente más estables.

El análisis estadístico confirmó diferencias altamente significativas entre los sistemas evaluados ($p < 0,001$), indicando que el incremento de la complejidad estructural del agroecosistema estuvo acompañado por un aumento sostenido de la diversidad ecológica. Garibaldi et al. (2016) demostraron que las comunidades funcionalmente diversas incrementan la eficiencia del proceso de polinización, mientras que Dainese et al. (2019) señalaron que la diversidad biológica fortalece la estabilidad de los servicios ecosistémicos responsables del mantenimiento de la productividad agrícola.

En conjunto, estos resultados indican que la diversificación agrícola no solo incrementa la riqueza y abundancia de los polinizadores, sino que también favorece comunidades más equilibradas desde el punto de vista ecológico, condición que incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a las variaciones ambientales y contribuye al mantenimiento de los procesos de polinización.

Tabla 6.

Índices de diversidad de insectos polinizadores según nivel de diversificación

Índice	Baja diversificación	Diversificación media	Alta diversificación	p
Shannon-Wiener	2,18 ± 0,21	2,86 ± 0,24	3,42 ± 0,19	< 0,001
Simpson	0,78 ± 0,04	0,87 ± 0,03	0,93 ± 0,02	< 0,001
Pielou	0,64 ± 0,05	0,74 ± 0,06	0,84 ± 0,04	< 0,001

Nota. Elaboración propia a partir de los índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou calculados para cada nivel de diversificación. p = nivel de significación estadística.

Composición de órdenes según nivel de diversificación

La composición taxonómica de las comunidades de insectos polinizadores presentó variaciones importantes entre los diferentes niveles de diversificación agrícola. Aunque Hymenoptera fue el orden predominante en las tres categorías evaluadas, la participación relativa de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera aumentó conforme se incrementó la complejidad estructural de los agroecosistemas. Este comportamiento evidencia que los sistemas más diversificados favorecen comunidades taxonómicamente más completas y funcionalmente más equilibradas.

Rader et al. (2015) señalan que los procesos de polinización en los ecosistemas agrícolas dependen de la participación conjunta de múltiples grupos taxonómicos y no exclusivamente de las abejas. De igual manera, IPBES (2016) destaca que la diversidad funcional de los polinizadores incrementa la estabilidad del servicio ecosistémico frente a cambios ambientales y perturbaciones del paisaje. Los resultados obtenidos en esta investigación reflejan este comportamiento, ya que el incremento de la diversificación agrícola estuvo acompañado por una mayor representación de diferentes órdenes de insectos polinizadores.

La incorporación progresiva de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera en los sistemas altamente diversificados sugiere que la disponibilidad de recursos florales, refugios y microhábitats favorece el establecimiento de organismos con requerimientos ecológicos diferentes. Dainese et al. (2019) sostienen que esta diversidad funcional incrementa la resiliencia de los agroecosistemas y fortalece la provisión de servicios ecosistémicos relacionados con la productividad agrícola.

Tabla 7.

Distribución de insectos polinizadores por orden y nivel de diversificación

Orden	Baja diversificación	Diversificación media	Alta diversificación	Total
Hymenoptera	578	752	957	2.287
Diptera	143	251	402	796
Lepidoptera	79	143	256	478
Coleoptera	46	71	168	285
Total	846	1.217	1.783	3.846

Nota. Elaboración propia a partir de la clasificación taxonómica y del número de individuos registrados por orden en los tres niveles de diversificación agrícola.

Eficiencia de las técnicas de muestreo

Las tres técnicas de muestreo empleadas durante la investigación demostraron ser complementarias para caracterizar la comunidad de insectos polinizadores presente en los sistemas agrícolas evaluados. Los transectos de observación registraron la mayor proporción de individuos, mientras que la captura mediante red entomológica y las trampas de colores aportaron información adicional sobre grupos cuya detección mediante observación directa resulta más limitada.

Dicks et al. (2021) destacan que la combinación de diferentes metodologías de muestreo incrementa significativamente la representatividad de los inventarios biológicos al permitir registrar especies con distintos patrones de comportamiento. En el mismo sentido, Prendergast et al. (2020) señalan que la utilización simultánea de observaciones directas, capturas activas y trampas pasivas reduce los sesgos metodológicos asociados con la aplicación de un único procedimiento de muestreo.

Los resultados obtenidos evidencian que cada técnica aportó información complementaria para la caracterización de la comunidad de polinizadores. Mientras los transectos permitieron registrar con mayor eficiencia la actividad de los visitantes florales, las redes entomológicas facilitaron la identificación taxonómica detallada de numerosos ejemplares y las trampas de colores incrementaron la detección de especies de pequeño tamaño y de comportamiento menos conspicuo. Esta complementariedad metodológica fortaleció la confiabilidad del inventario biológico y proporcionó una caracterización más completa de la diversidad de insectos polinizadores presente en los agroecosistemas estudiados.

Tabla 8.

Número de individuos registrados según técnica de muestreo

Técnica	Número de individuos	Porcentaje (%)
Transectos de observación	1.672	43,5
Red entomológica	1.124	29,2
Trampas de colores	1.050	27,3
Total	3.846	100,0

Nota. Elaboración propia a partir de los individuos registrados mediante transectos de observación, red entomológica y trampas de colores.

Productividad agrícola según nivel de diversificación

Los indicadores de productividad agrícola evidenciaron diferencias significativas entre los tres niveles de diversificación evaluados. Los sistemas altamente diversificados alcanzaron los mejores resultados en rendimiento por hectárea, porcentaje de frutos formados, peso promedio de los frutos y proporción de frutos comercializables, mientras que los sistemas con baja diversificación registraron los valores más reducidos. Este comportamiento demuestra que el incremento de la complejidad estructural del agroecosistema estuvo acompañado por una mejora consistente del desempeño productivo.

Garibaldi et al. (2016) demostraron que la presencia de comunidades diversas de polinizadores incrementa significativamente la formación de frutos en diferentes cultivos, mientras que Dainese et al. (2019) evidenciaron que la biodiversidad funcional fortalece la productividad agrícola mediante el mejoramiento de diversos servicios ecosistémicos. Los resultados obtenidos en la presente investigación siguen este mismo patrón, mostrando que los sistemas con mayor diversificación presentaron ventajas tanto en la cantidad como en la calidad de la producción. El análisis estadístico confirmó diferencias significativas entre los sistemas agrícolas para todos los indicadores productivos evaluados. Estos hallazgos sugieren que la diversificación agrícola favorece condiciones ambientales capaces de fortalecer simultáneamente la conservación de los polinizadores y el rendimiento de los cultivos, contribuyendo a mejorar la eficiencia de los sistemas agrícolas.

Tabla 9.

Indicadores de productividad agrícola según nivel de diversificación

Indicador	Baja diversificación	Diversificación media	Alta diversificación	p
Rendimiento (t ha ⁻¹)	13,2 ± 1,5	15,8 ± 1,7	18,7 ± 1,9	< 0,001
Frutos formados (%)	54,6 ± 5,8	67,9 ± 6,2	79,4 ± 5,5	< 0,001
Peso promedio de fruto (g)	128,5 ± 14,2	146,7 ± 15,8	167,9 ± 17,3	0,002
Frutos comercializables (%)	68,4 ± 6,1	78,6 ± 5,7	87,2 ± 4,8	< 0,001

Nota. Elaboración propia a partir de los indicadores productivos registrados en las unidades agrícolas evaluadas. p = nivel de significación estadística.

Relación entre riqueza de polinizadores y rendimiento agrícola

El análisis de correlación evidenció una asociación positiva y altamente significativa entre la riqueza de especies de insectos polinizadores y el rendimiento agrícola. Este resultado indica que las unidades productivas con mayor diversidad de especies tendieron a presentar niveles superiores de producción, respaldando la importancia ecológica de los polinizadores dentro de los sistemas agrícolas diversificados.

Garibaldi et al. (2016) demostraron que el incremento de la diversidad de polinizadores mejora la eficiencia del proceso de polinización y favorece el rendimiento de numerosos cultivos, independientemente de la abundancia de abejas manejadas. En concordancia con estos resultados, Dainese et al. (2019) señalaron que la biodiversidad constituye uno de los principales factores asociados con el incremento sostenible de la productividad agrícola. La relación observada en el presente estudio coincide con estos planteamientos y refuerza la importancia de conservar comunidades diversas de insectos polinizadores.

El modelo de regresión mostró que una proporción importante de la variabilidad del rendimiento agrícola pudo explicarse mediante las diferencias observadas en la riqueza de especies, lo que evidencia la elevada capacidad predictiva de este indicador ecológico sobre el desempeño productivo de los sistemas agrícolas evaluados.

Tabla 10.

Correlación entre indicadores de diversidad y rendimiento agrícola

Variable	Coefficiente de correlación	p	Interpretación
Riqueza de especies	0,74	< 0,001	Positiva alta
Abundancia total	0,68	0,002	Positiva moderada-alta
Shannon-Wiener	0,77	< 0,001	Positiva alta
Simpson	0,65	0,003	Positiva moderada-alta
Pielou	0,59	0,010	Positiva moderada

Nota. Elaboración propia. r = coeficiente de correlación de Pearson entre los indicadores de diversidad y el rendimiento agrícola; p = nivel de significación estadística.

Relación entre diversidad y formación de frutos

La formación de frutos presentó asociaciones positivas y estadísticamente significativas con todos los indicadores de diversidad de insectos polinizadores evaluados. Entre ellos, el índice de Shannon-Wiener mostró la relación más estrecha, seguido por la riqueza específica y la abundancia de individuos, evidenciando que las comunidades ecológicamente más diversas favorecieron una mayor eficiencia reproductiva de los cultivos.

Potts et al. (2016) demostraron que la polinización constituye uno de los principales factores responsables del éxito reproductivo de numerosos cultivos agrícolas, mientras que Garibaldi et al. (2016) evidenciaron que las comunidades diversas de polinizadores incrementan significativamente la formación de frutos mediante una mayor frecuencia y eficiencia de las visitas florales. Los resultados obtenidos en esta investigación respaldan estos planteamientos y muestran que la diversidad biológica desempeña un papel determinante en la productividad agrícola.

El análisis de regresión confirmó que el índice de Shannon-Wiener presentó la mayor capacidad para explicar la variabilidad observada en el porcentaje de frutos formados, indicando que las comunidades más diversas y equilibradas favorecieron procesos de polinización más eficientes.

Tabla 11.

Correlación entre indicadores de diversidad y porcentaje de frutos formados

Variable	Coefficiente de correlación	p
Riqueza	0,79	< 0,001
Abundancia	0,72	< 0,001
Shannon-Wiener	0,81	< 0,001
Simpson	0,69	0,002
Pielou	0,63	0,005

Nota. Elaboración propia. r = coeficiente de correlación de Pearson entre los indicadores de diversidad y el porcentaje de frutos formados; p = nivel de significación estadística.

Relación entre diversidad y peso promedio de frutos

El peso promedio de los frutos mostró una asociación positiva con los principales indicadores de diversidad de insectos polinizadores, destacándose nuevamente el índice de Shannon-Wiener y la riqueza de especies como las variables con mayor relación respecto a esta característica productiva. Estos resultados indican que la diversidad biológica no solo favoreció el rendimiento agrícola, sino también atributos relacionados con la calidad de los productos cosechados.

Dainese et al. (2019) sostienen que la biodiversidad puede influir sobre diferentes componentes de la producción mediante la mejora de los procesos de polinización, mientras que Garibaldi et al. (2016) demostraron que una polinización más eficiente favorece un desarrollo más uniforme de los frutos y mejora sus características comerciales. En concordancia con esta evidencia, los resultados obtenidos indican que las comunidades de polinizadores más diversas estuvieron asociadas con frutos de mayor peso promedio.

Relación entre diversidad y proporción de frutos comercializables

La proporción de frutos comercializables también presentó asociaciones positivas y estadísticamente significativas con los principales indicadores de diversidad de insectos polinizadores. El índice de Shannon-Wiener mostró nuevamente la relación más elevada, seguido por la riqueza específica, evidenciando que las comunidades ecológicamente más diversas favorecieron simultáneamente la cantidad y la calidad de la producción agrícola.

Garibaldi et al. (2016) destacan que una mayor diversidad de polinizadores incrementa no solo el rendimiento, sino también diversos atributos comerciales de los frutos. De forma complementaria, Dainese et al. (2019) señalan que la biodiversidad funcional fortalece múltiples componentes de la productividad agrícola, favoreciendo sistemas de producción más sostenibles y resilientes.

Al analizar conjuntamente todas las variables productivas, se observó que el índice de Shannon-Wiener presentó las asociaciones más consistentes con el rendimiento, la formación de frutos, el peso promedio y la proporción de frutos

comercializables. Este comportamiento evidencia que la estructura ecológica de las comunidades de polinizadores constituye un componente determinante para explicar el desempeño productivo de los sistemas agrícolas evaluados.

Tabla 12.

Correlación entre diversidad y variables productivas

Indicador de diversidad	Rendimiento	Formación de frutos	Peso promedio	Frutos comercializables
Riqueza	0,74	0,79	0,62	0,71
Abundancia	0,68	0,72	0,57	0,65
Shannon-Wiener	0,77	0,81	0,66	0,75
Simpson	0,65	0,69	0,54	0,63
Pielou	0,59	0,63	0,48	0,58

Nota. Elaboración propia. Los valores corresponden a coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los indicadores de diversidad y las variables productivas evaluadas.

Relación entre índice de diversificación y diversidad de polinizadores

El índice de diversificación agrícola presentó asociaciones positivas y altamente significativas con todos los indicadores ecológicos evaluados. Conforme aumentó la complejidad estructural de los agroecosistemas, también se incrementaron la riqueza de especies, la abundancia de individuos y los índices de diversidad ecológica, evidenciando que la heterogeneidad del paisaje favorece comunidades de polinizadores más diversas y funcionalmente equilibradas. Dicks et al. (2021) demostraron que la disponibilidad de hábitats seminaturales y recursos florales constituye uno de los principales factores que explican la diversidad de las comunidades de abejas silvestres. De forma complementaria, Tamburini et al. (2020) sostienen que la diversificación del paisaje agrícola fortalece simultáneamente la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos. Los resultados obtenidos en esta investigación siguen este mismo comportamiento y evidencian que el incremento del índice de diversificación estuvo acompañado por una mejora consistente de los indicadores ecológicos.

El índice de Shannon-Wiener presentó la asociación más estrecha con la diversificación agrícola, indicando que la complejidad del paisaje no solo favoreció la presencia de un mayor número de especies, sino también una distribución más equilibrada de sus abundancias. Dainese et al. (2019) señalan que este comportamiento incrementa la resiliencia ecológica de los agroecosistemas y fortalece la estabilidad de los procesos de polinización.

Tabla 13.

Relación entre diversificación agrícola e indicadores ecológicos

Indicador ecológico	Correlación con índice de diversificación	p
Riqueza	0,83	< 0,001
Abundancia	0,78	< 0,001
Shannon-Wiener	0,86	< 0,001
Simpson	0,76	< 0,001
Pielou	0,69	0,002

Nota. Elaboración propia. r = coeficiente de correlación de Pearson entre el índice de diversificación agrícola y los indicadores ecológicos; p = nivel de significación estadística.

Influencia de los componentes de diversificación

El análisis individual de los componentes estructurales del paisaje permitió identificar diferencias en la magnitud de su influencia sobre la riqueza de insectos polinizadores. Entre todos los elementos evaluados, la disponibilidad de recursos florales presentó la relación más estrecha con la riqueza de especies, seguida por la cobertura vegetal, el número de cultivos, la presencia de cercas vivas y la abundancia de árboles y arbustos.

Tamburini et al. (2020) demostraron que la disponibilidad continua de flores incrementa significativamente las poblaciones de polinizadores dentro de los agroecosistemas, mientras que Dicks et al. (2021) destacan que la

heterogeneidad estructural del paisaje constituye uno de los principales factores asociados con la conservación de la biodiversidad. En concordancia con estos planteamientos, los resultados obtenidos evidencian que la oferta permanente de recursos alimenticios desempeña un papel determinante para mantener comunidades diversas de insectos polinizadores.

Asimismo, la cobertura vegetal, las cercas vivas y la presencia de árboles contribuyeron positivamente a la riqueza de especies, lo que sugiere que la incorporación de estos componentes incrementa la disponibilidad de refugios, sitios de reproducción y corredores ecológicos para diferentes grupos funcionales de insectos.

Tabla 14.

Relación entre componentes de diversificación y riqueza de polinizadores

Componente	r	p
Recursos florales	0,81	< 0,001
Cobertura vegetal	0,76	< 0,001
Número de cultivos	0,72	0,001
Cercas vivas	0,68	0,002
Árboles y arbustos	0,64	0,004

Nota. Elaboración propia. r = coeficiente de correlación de Pearson entre cada componente de diversificación y la riqueza de polinizadores; p = nivel de significación estadística.

Modelos de regresión para la productividad agrícola

El modelo de regresión múltiple evidenció una elevada capacidad para explicar la variabilidad observada en el rendimiento agrícola a partir de las variables ecológicas consideradas en la investigación. Entre los predictores evaluados, el índice de Shannon-Wiener presentó la mayor contribución al modelo, seguido por el nivel de diversificación agrícola y la riqueza de especies, mientras que la abundancia total de individuos no mostró un efecto significativo cuando fue analizada conjuntamente con las demás variables.

Garibaldi et al. (2016) destacan que la estructura ecológica de las comunidades de polinizadores constituye un mejor predictor del rendimiento agrícola que la abundancia absoluta de organismos. De manera similar, Dainese et al. (2019) señalan que la diversidad funcional incrementa la estabilidad de los servicios ecosistémicos y fortalece la productividad de los cultivos. Los resultados obtenidos respaldan estos planteamientos y evidencian que la organización ecológica de las comunidades posee una mayor capacidad explicativa del rendimiento que el número total de insectos registrados.

Tabla 15.

Modelo de regresión múltiple para rendimiento agrícola

Variable predictora	β estandarizado	t	p
Riqueza	0,29	2,41	0,031
Abundancia	0,17	1,67	0,118
Shannon-Wiener	0,42	3,28	0,006
Nivel de diversificación	0,35	2,83	0,014

Nota. Elaboración propia. β = coeficiente estandarizado; t = estadístico de prueba; p = nivel de significación estadística.

Comprobación de hipótesis

Los análisis estadísticos permitieron comprobar las hipótesis planteadas al inicio de la investigación. El análisis de varianza confirmó diferencias estadísticamente significativas en la riqueza, abundancia, diversidad ecológica y productividad agrícola entre los sistemas con diferentes niveles de diversificación, observándose consistentemente los mayores valores en las unidades altamente diversificadas.

Las pruebas de correlación evidenciaron asociaciones positivas y significativas entre los indicadores de diversidad de polinizadores y todas las variables productivas evaluadas. Garibaldi et al. (2016) demostraron que las comunidades diversas incrementan la eficiencia del proceso de polinización y favorecen el rendimiento agrícola, mientras que

Dainese et al. (2019) señalaron que la biodiversidad constituye un componente esencial para fortalecer los servicios ecosistémicos responsables de la producción de cultivos. Los resultados obtenidos coinciden con esta evidencia y respaldan la relación positiva entre diversificación agrícola, biodiversidad de polinizadores y productividad. En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis de investigación, confirmando que los sistemas agrícolas con mayor nivel de diversificación presentan comunidades de insectos polinizadores significativamente más ricas, abundantes y diversas, y que estas características se relacionan positivamente con mejores indicadores de productividad agrícola.

Síntesis de los principales resultados

Los resultados obtenidos demostraron de manera consistente que los sistemas agrícolas altamente diversificados presentaron mayores niveles de riqueza, abundancia y diversidad de insectos polinizadores que los sistemas con diversificación media y baja. Paralelamente, estos agroecosistemas alcanzaron los mejores indicadores de productividad, evidenciando un incremento del rendimiento agrícola, una mayor formación de frutos, un mayor peso promedio y una mayor proporción de frutos comercializables.

Garibaldi et al. (2016) señalan que la diversidad de polinizadores constituye uno de los principales factores asociados con la productividad de los cultivos, mientras que Dainese et al. (2019) destacan que la biodiversidad funcional fortalece la estabilidad de los servicios ecosistémicos responsables de la producción agrícola. En concordancia con estos planteamientos, la presente investigación evidenció que la diversidad ecológica de las comunidades de polinizadores presentó una mayor capacidad para explicar el desempeño productivo que la abundancia total de individuos.

En conjunto, los resultados confirman que la diversificación agrícola favorece simultáneamente la conservación de comunidades diversas de insectos polinizadores y el fortalecimiento de la productividad de los sistemas agrícolas, proporcionando evidencia que respalda la importancia de integrar estrategias de conservación de la biodiversidad dentro de los modelos de producción agropecuaria.

4. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos demuestran que la diversificación de los sistemas agrícolas constituye un factor estrechamente asociado con el incremento de la riqueza, abundancia y diversidad de los insectos polinizadores, así como con mejoras significativas en los indicadores de productividad agrícola. Los sistemas altamente diversificados presentaron los mayores valores de riqueza específica, diversidad ecológica y equidad de las comunidades de polinizadores, acompañados de incrementos en el rendimiento, la formación de frutos, el peso promedio y la proporción de frutos comercializables. Garibaldi et al. (2016) demostraron que la diversidad de polinizadores incrementa significativamente la formación de frutos en distintos cultivos, mientras que Dainese et al. (2019) evidenciaron que la biodiversidad favorece la productividad mediante el fortalecimiento de los servicios ecosistémicos. Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con estas evidencias y respaldan la importancia de la biodiversidad funcional como un componente esencial para la sostenibilidad de los agroecosistemas.

El registro de 3.846 individuos, pertenecientes a 96 especies o morfoespecies, 54 géneros, 22 familias y cuatro órdenes de insectos, pone de manifiesto la elevada diversidad biológica presente en los sistemas agrícolas evaluados. Esta riqueza taxonómica evidencia que los agroecosistemas pueden desempeñar un papel importante en la conservación de la biodiversidad cuando mantienen condiciones adecuadas de alimentación, refugio y reproducción para los polinizadores. Miñarro et al. (2018) destacan que la gestión adecuada de la biodiversidad agrícola incrementa la capacidad de los sistemas productivos para mantener comunidades diversas de insectos y fortalecer los servicios ecosistémicos asociados con la polinización. En concordancia con este planteamiento, la elevada riqueza observada en esta investigación sugiere que las prácticas de diversificación favorecen simultáneamente la conservación de especies y el funcionamiento ecológico de los sistemas agrícolas.

La mayor diversidad registrada en los sistemas altamente diversificados también coincide con las conclusiones presentadas por IPBES (2016), organismo que reconoce la heterogeneidad ambiental como uno de los principales

factores responsables del mantenimiento de las comunidades de polinizadores. La coexistencia de múltiples cultivos, vegetación espontánea, árboles, cercas vivas y recursos florales continuos genera una amplia variedad de nichos ecológicos que favorecen la presencia de especies con diferentes requerimientos biológicos. Como consecuencia, la estructura del agroecosistema adquiere un papel determinante en la capacidad de los paisajes agrícolas para conservar comunidades funcionalmente diversas y mantener procesos ecológicos asociados con la polinización.

Uno de los resultados más relevantes corresponde al predominio del orden Hymenoptera, responsable de la mayor parte de la abundancia registrada durante la investigación. Potts et al. (2016) identificaron a este grupo como el principal responsable de la polinización de numerosos cultivos de importancia económica, debido a su elevada eficiencia en la transferencia de polen. Sin embargo, los resultados obtenidos también evidenciaron una participación importante de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera, confirmando que la polinización agrícola depende de comunidades taxonómicamente diversas. Rader et al. (2015) sostienen que múltiples grupos de insectos contribuyen simultáneamente a este proceso ecológico, incrementando la estabilidad del servicio de polinización frente a variaciones ambientales y reduciendo la dependencia de un único grupo funcional.

La elevada representación de diferentes órdenes observada en los sistemas altamente diversificados refuerza la importancia de conservar comunidades biológicas completas y funcionalmente complementarias. Dainese et al. (2019) señalan que la diversidad funcional incrementa la resiliencia de los servicios ecosistémicos al permitir que diferentes especies respondan de manera distinta frente a las perturbaciones ambientales. Desde esta perspectiva, la participación conjunta de himenópteros, dípteros, lepidópteros y coleópteros registrada en el presente estudio constituye un indicador del adecuado funcionamiento ecológico de los sistemas agrícolas diversificados.

La investigación también evidenció un incremento progresivo de la abundancia de polinizadores conforme aumentó el nivel de diversificación agrícola. Este comportamiento sugiere que los sistemas con mayor heterogeneidad estructural proporcionan condiciones más favorables para el establecimiento y permanencia de poblaciones numerosas de insectos visitantes florales. Tamburini et al. (2020) demostraron que la abundancia de abejas responde tanto al manejo agrícola como a la composición del paisaje circundante, mientras que Dicks et al. (2021) confirmaron que la disponibilidad continua de recursos florales constituye uno de los principales factores que determinan el tamaño de las comunidades de polinizadores dentro de los agroecosistemas. Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con estas observaciones y refuerzan la importancia de conservar paisajes agrícolas estructuralmente complejos.

Sin embargo, el incremento de la abundancia por sí solo no garantiza una mayor estabilidad ecológica. La presente investigación demostró que los sistemas altamente diversificados también registraron un aumento significativo de la riqueza de especies y de los índices de diversidad, indicando que la mejora observada no estuvo determinada únicamente por un mayor número de individuos, sino por comunidades ecológicamente más completas. Garibaldi et al. (2016) sostienen que la diversidad funcional proporciona beneficios adicionales a los derivados de la abundancia absoluta de polinizadores, ya que diferentes especies participan de manera complementaria durante el proceso de polinización. Esta interpretación es consistente con los resultados obtenidos, donde las comunidades más diversas estuvieron asociadas con mejores indicadores productivos.

El comportamiento observado en la riqueza específica también coincide con la síntesis global desarrollada por Dicks et al. (2021), quienes concluyeron que tanto los factores locales como las características del paisaje influyen significativamente sobre la diversidad de las comunidades de abejas silvestres. En el presente estudio, los sistemas altamente diversificados albergaron un número considerablemente mayor de especies que los sistemas simplificados, lo que sugiere que la disponibilidad de múltiples cultivos, vegetación espontánea, árboles y cercas vivas incrementó la oferta de recursos y permitió la coexistencia de organismos con diferentes requerimientos ecológicos.

La respuesta de los índices de diversidad aporta información adicional sobre el funcionamiento de los agroecosistemas. El incremento observado en los índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou indica que la diversificación agrícola favoreció comunidades con una distribución más equilibrada de sus abundancias, reduciendo la dominancia de unas pocas especies. Roswell et al. (2021) señala que este comportamiento constituye un indicador de estabilidad

ecológica, mientras que Roswell et al. (2021) destacan que las comunidades equilibradas presentan una mayor capacidad para mantener los procesos ecológicos frente a perturbaciones ambientales. Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos evidencian que la diversificación agrícola fortalece no solamente la riqueza biológica, sino también la organización funcional de las comunidades de polinizadores.

Otro aspecto relevante corresponde a las diferencias observadas en la composición taxonómica entre los distintos niveles de diversificación. Aunque Hymenoptera fue el grupo dominante en todos los sistemas evaluados, los agroecosistemas más complejos presentaron una mayor representación relativa de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera. Rader et al. (2015) explican que la polinización agrícola depende de la acción conjunta de múltiples grupos de insectos, cuyas funciones pueden complementarse bajo diferentes condiciones ambientales. En consecuencia, la mayor participación de estos órdenes en los sistemas altamente diversificados constituye un indicador de una mayor diversidad funcional y de una menor dependencia de un único grupo de polinizadores.

Los resultados relacionados con las técnicas de muestreo también aportan información metodológica relevante. La combinación de transectos de observación, redes entomológicas y trampas de colores permitió obtener un inventario más completo de la comunidad de polinizadores que el que habría sido posible mediante una única técnica de captura. Dicks et al. (2021) recomiendan la utilización de metodologías complementarias para reducir los sesgos asociados al comportamiento diferencial de los distintos grupos de insectos, mientras que Prendergast et al. (2020) destacan que la integración de varios métodos incrementa la representatividad de los inventarios biológicos. La experiencia obtenida durante esta investigación confirma la utilidad de este enfoque para estudios desarrollados en agroecosistemas diversificados.

Uno de los hallazgos más relevantes de la investigación corresponde al efecto positivo que la diversificación agrícola ejerció sobre la productividad de los cultivos. Los sistemas altamente diversificados alcanzaron los mejores indicadores de rendimiento, formación de frutos, peso promedio y proporción de frutos comercializables, evidenciando que el incremento de la complejidad estructural del agroecosistema estuvo acompañado por una mejora consistente del desempeño productivo. Garibaldi et al. (2016) demostraron que la presencia de comunidades diversas de polinizadores incrementa significativamente la producción de frutos en distintos cultivos, mientras que Dainese et al. (2019) concluyeron que la biodiversidad favorece la productividad agrícola mediante el fortalecimiento de múltiples servicios ecosistémicos. Los resultados obtenidos en esta investigación respaldan estos planteamientos y evidencian que la conservación de la biodiversidad funcional constituye una estrategia compatible con el incremento de la producción agrícola.

No obstante, la relación observada entre diversificación agrícola y productividad no debe interpretarse únicamente como una consecuencia del aumento en el número de especies vegetales presentes dentro del sistema. La diversificación modifica simultáneamente múltiples componentes ecológicos, incrementando la disponibilidad de recursos florales, mejorando las condiciones microclimáticas y favoreciendo la presencia de organismos beneficiosos. Tamburini et al. (2020) sostienen que estos procesos actúan de manera complementaria y fortalecen el funcionamiento ecológico de los agroecosistemas, permitiendo mantener niveles elevados de productividad sin incrementar necesariamente la dependencia de insumos externos.

La fuerte asociación observada entre la diversidad de polinizadores y la formación de frutos constituye otro de los principales aportes del estudio. Los sistemas con comunidades más diversas presentaron mayores niveles de éxito reproductivo, evidenciando que la diversidad funcional desempeña un papel determinante durante el proceso de fecundación de las flores. Potts et al. (2016) demostraron que numerosos cultivos dependen de la polinización animal para completar adecuadamente su reproducción, mientras que Garibaldi et al. (2016) señalaron que las comunidades diversas de polinizadores incrementan la frecuencia y eficiencia de las visitas florales. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento consistente con esta evidencia y sugieren que la complementariedad funcional entre diferentes especies favorece una polinización más eficiente.

El incremento observado en el peso promedio de los frutos también refleja la importancia ecológica de las comunidades de polinizadores. Una polinización más eficiente favorece un desarrollo más uniforme de semillas y

frutos, mejorando atributos relacionados con la calidad de la producción. Dainese et al. (2019) destacan que la biodiversidad puede influir simultáneamente sobre la cantidad y la calidad de los productos agrícolas, mientras que Garibaldi et al. (2016) evidenciaron que una mayor diversidad de polinizadores incrementa diferentes atributos comerciales de los cultivos. En este sentido, los resultados del presente estudio indican que la conservación de comunidades funcionalmente diversas puede generar beneficios económicos adicionales para los productores.

La relación positiva identificada entre la diversidad de polinizadores y la proporción de frutos comercializables refuerza esta interpretación. Los sistemas altamente diversificados no solo produjeron una mayor cantidad de frutos, sino que también obtuvieron productos con mejores características para su comercialización. Potts et al. (2016) señalan que la creciente dependencia de la agricultura respecto a la polinización animal convierte a estos organismos en un componente estratégico para la producción de alimentos, mientras que IPBES (2016) reconoce que la conservación de los polinizadores genera beneficios que trascienden el ámbito ecológico y repercuten directamente sobre la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las actividades agrícolas.

Las correlaciones observadas entre los indicadores ecológicos y las variables productivas constituyen una evidencia adicional de la estrecha relación existente entre biodiversidad y productividad. La riqueza de especies y, especialmente, el índice de Shannon-Wiener presentaron asociaciones positivas con el rendimiento agrícola, la formación de frutos, el peso promedio y la calidad comercial. Garibaldi et al. (2016) sostienen que la diversidad funcional posee una mayor capacidad para explicar el comportamiento de los servicios de polinización que la abundancia absoluta de individuos, debido a que diferentes especies desempeñan funciones complementarias durante el proceso reproductivo de las plantas. Los resultados obtenidos en la presente investigación respaldan este planteamiento al mostrar que los indicadores de diversidad presentaron una mayor capacidad explicativa que la abundancia total de insectos.

El modelo de regresión múltiple fortaleció esta interpretación al identificar al índice de Shannon-Wiener como el predictor con mayor capacidad para explicar la variabilidad observada en el rendimiento agrícola. Este resultado pone de manifiesto que la estructura ecológica de las comunidades de polinizadores constituye un componente más importante para el desempeño productivo que el simple incremento en el número de individuos. Dainese et al. (2019) destacan que la diversidad funcional incrementa la estabilidad de los servicios ecosistémicos al reducir la dependencia de un número limitado de especies, mientras que Dicks et al. (2021) demostraron que diferentes grupos de polinizadores responden de manera distinta frente a las perturbaciones ambientales, favoreciendo la resiliencia del sistema cuando las comunidades presentan una mayor diversidad.

El análisis de los componentes estructurales del agroecosistema permitió identificar que la disponibilidad de recursos florales fue el factor con mayor asociación respecto a la riqueza de insectos polinizadores. Este resultado pone de manifiesto la importancia de garantizar una oferta continua de néctar y polen durante todo el ciclo agrícola para mantener comunidades diversas y funcionalmente estables. Tamburini et al. (2020) demostraron que la restauración de cercas vivas y la incorporación de vegetación con floración escalonada incrementan significativamente las poblaciones de abejas nativas dentro de los paisajes agrícolas. De manera complementaria, Dicks et al. (2021) sostienen que la disponibilidad permanente de recursos alimenticios constituye uno de los principales determinantes de la diversidad de polinizadores en los agroecosistemas.

Además de los recursos florales, la cobertura vegetal, el número de cultivos, la presencia de árboles y las cercas vivas mostraron una influencia positiva sobre la riqueza de especies registrada durante la investigación. Estos componentes incrementan la heterogeneidad del paisaje y proporcionan refugios, sitios de reproducción y corredores ecológicos que favorecen el desplazamiento de los polinizadores entre diferentes áreas de cultivo. Tamburini et al. (2020) demostraron que la pérdida de elementos naturales reduce progresivamente la eficiencia de los servicios de polinización, mientras que Tamburini et al. (2020) evidenciaron que la proximidad a hábitats seminaturales incrementa la riqueza y abundancia de insectos polinizadores. En conjunto, estos antecedentes respaldan la importancia de conservar la estructura ecológica de los agroecosistemas como parte de las estrategias destinadas a fortalecer la productividad agrícola.

Los resultados obtenidos también aportan evidencia a favor del enfoque de intensificación ecológica, el cual propone incrementar la producción agrícola mediante el fortalecimiento de los procesos naturales que sustentan el funcionamiento de los agroecosistemas. Tamburini et al. (2020) sostienen que la conservación de la biodiversidad no constituye un objetivo independiente de la producción agrícola, sino un componente esencial para mantener la productividad en el largo plazo. Los resultados de la presente investigación muestran que la diversificación agrícola favorece simultáneamente la conservación de los polinizadores y el incremento del rendimiento, confirmando que ambos objetivos pueden desarrollarse de manera complementaria.

Desde una perspectiva aplicada, los hallazgos obtenidos indican que la incorporación de múltiples cultivos, franjas florales, cercas vivas, árboles dispersos y vegetación espontánea representa una estrategia eficaz para fortalecer los servicios ecosistémicos de polinización. La reducción del uso indiscriminado de insecticidas y la conservación de remanentes de vegetación natural también constituyen prácticas que pueden favorecer la permanencia de comunidades diversas de polinizadores y contribuir al mantenimiento de la productividad agrícola. IPBES (2016) destaca que este tipo de medidas incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a las perturbaciones ambientales y favorece la sostenibilidad de la producción de alimentos.

A pesar de la consistencia de los resultados obtenidos, la investigación presenta algunas limitaciones que deben considerarse durante la interpretación de los hallazgos. El diseño observacional permitió establecer asociaciones sólidas entre la diversidad de polinizadores y la productividad agrícola; sin embargo, no permite demostrar relaciones estrictamente causales entre ambas variables. Además, factores como la fertilidad del suelo, la disponibilidad de agua, las prácticas de fertilización, las características varietales de los cultivos o las condiciones climáticas también pueden influir sobre los indicadores productivos evaluados. En consecuencia, futuras investigaciones deberían incorporar diseños experimentales y modelos multivariados que permitan estimar con mayor precisión la contribución individual de cada uno de estos factores.

Otra limitación corresponde al período de evaluación, desarrollado durante un único ciclo de floración. Estudios de mayor duración permitirían analizar la estabilidad temporal de las comunidades de polinizadores y evaluar la influencia de las variaciones climáticas interanuales sobre la relación entre biodiversidad y productividad. Asimismo, la incorporación de análisis de diversidad funcional, técnicas moleculares para la identificación taxonómica y estudios de redes de interacción planta–polinizador contribuiría a comprender con mayor profundidad los mecanismos ecológicos responsables de los patrones observados durante la presente investigación.

En conjunto, los resultados obtenidos demuestran que la diversificación agrícola constituye una estrategia capaz de fortalecer simultáneamente la conservación de la biodiversidad y el desempeño productivo de los sistemas agrícolas. La mayor riqueza, abundancia y diversidad de insectos polinizadores registrada en los sistemas altamente diversificados estuvo acompañada por incrementos consistentes en el rendimiento, la formación de frutos, el peso promedio y la calidad comercial de la producción. Estos hallazgos aportan evidencia que respalda la incorporación de criterios de conservación de la biodiversidad dentro de las estrategias de manejo agrícola y fortalecen el papel de los servicios ecosistémicos como componentes fundamentales para el desarrollo de sistemas productivos sostenibles.

5. CONCLUSIÓN

La presente investigación demostró que la diversificación de los sistemas agrícolas constituye un factor determinante para favorecer la conservación de comunidades diversas de insectos polinizadores y fortalecer la productividad de los agroecosistemas. Los sistemas altamente diversificados presentaron una mayor riqueza, abundancia y diversidad de insectos polinizadores, acompañadas de mejores indicadores de rendimiento agrícola, formación de frutos, peso promedio y proporción de frutos comercializables. Estos resultados evidencian que la heterogeneidad estructural del paisaje agrícola desempeña un papel fundamental tanto en el mantenimiento de la biodiversidad como en el desempeño productivo de los cultivos.

El inventario realizado durante el estudio permitió registrar una comunidad altamente diversa de insectos polinizadores, integrada por 3.846 individuos pertenecientes a 96 especies o morfoespecies, distribuidas en 54 géneros, 22 familias y cuatro órdenes taxonómicos. Aunque Hymenoptera constituyó el grupo dominante, la

participación de Diptera, Lepidoptera y Coleoptera confirma que la polinización agrícola depende de comunidades funcionalmente diversas, donde diferentes grupos de insectos contribuyen de manera complementaria al mantenimiento de este servicio ecosistémico.

Los análisis ecológicos evidenciaron que la diversificación agrícola favoreció significativamente la riqueza, abundancia y diversidad de las comunidades de polinizadores. Asimismo, el incremento de los índices de Shannon-Wiener, Simpson y equidad de Pielou demuestra que los sistemas agrícolas más diversificados albergan comunidades más equilibradas y ecológicamente estables, condición que incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a las perturbaciones ambientales.

Desde el punto de vista productivo, los resultados mostraron que los sistemas altamente diversificados alcanzaron un mejor desempeño agrícola, reflejado en mayores niveles de rendimiento, formación de frutos, peso promedio y calidad comercial. Las asociaciones positivas identificadas entre los indicadores de diversidad de polinizadores y las variables productivas confirman que la biodiversidad funcional constituye un componente estratégico para incrementar simultáneamente la cantidad y la calidad de la producción agrícola.

El análisis de regresión permitió identificar que la estructura ecológica de las comunidades de polinizadores presentó una mayor capacidad para explicar el rendimiento agrícola que la abundancia absoluta de individuos. Este hallazgo pone de manifiesto que la organización y composición de las comunidades biológicas desempeñan un papel más relevante que el número total de insectos presentes, resaltando la importancia de conservar comunidades funcionalmente diversas para fortalecer los procesos de polinización.

Entre los componentes estructurales del agroecosistema, la disponibilidad continua de recursos florales constituyó el factor más estrechamente asociado con la riqueza de polinizadores, seguida por la cobertura vegetal, el número de cultivos, la presencia de cercas vivas y la existencia de árboles y arbustos. Estos resultados evidencian que el mantenimiento de paisajes agrícolas heterogéneos favorece simultáneamente la biodiversidad y la productividad, proporcionando una base científica para el diseño de estrategias de manejo orientadas hacia sistemas agrícolas más sostenibles.

Los resultados permitieron aceptar la hipótesis de investigación, confirmando que los sistemas agrícolas con mayor nivel de diversificación presentan comunidades de insectos polinizadores significativamente más ricas, abundantes y diversas, y que estas características se relacionan positivamente con mejores indicadores de productividad agrícola. En consecuencia, la diversificación agrícola debe entenderse como una estrategia que integra simultáneamente la conservación de la biodiversidad y la optimización del desempeño productivo de los agroecosistemas.

Desde una perspectiva aplicada, la investigación pone de manifiesto la importancia de promover prácticas agrícolas orientadas a incrementar la heterogeneidad estructural del paisaje mediante la incorporación de múltiples cultivos, franjas florales, cercas vivas, árboles dispersos y vegetación espontánea. Estas acciones favorecen la permanencia de comunidades diversas de insectos polinizadores y fortalecen la provisión de servicios ecosistémicos indispensables para la producción de alimentos.

Finalmente, se recomienda desarrollar investigaciones de largo plazo que permitan evaluar la estabilidad temporal de las comunidades de polinizadores, incorporar análisis de diversidad funcional y estudiar con mayor profundidad la interacción entre biodiversidad, manejo agrícola y productividad. La integración de estos enfoques contribuirá a generar estrategias de manejo basadas en evidencia científica que fortalezcan la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y la conservación de los insectos polinizadores.

Los resultados obtenidos aportan evidencia científica que respalda la incorporación de estrategias de diversificación agrícola como parte de los programas de producción sostenible. La conservación de comunidades diversas de insectos polinizadores no solo fortalece la provisión de servicios ecosistémicos esenciales para la agricultura, sino que también incrementa la resiliencia de los agroecosistemas frente a los desafíos derivados del cambio climático, la intensificación productiva y la pérdida de biodiversidad. En consecuencia, integrar la conservación de los polinizadores dentro de las políticas de manejo agrícola representa una oportunidad para mejorar simultáneamente la productividad, la sostenibilidad y la seguridad alimentaria en los sistemas agrícolas del futuro.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., Carvalheiro, L. G., Chaplin-Kramer, R., Gagic, V., Garibaldi, L. A., Ghazoul, J., Grab, H., Jonsson, M., Karp, D. S., Kennedy, C. M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D. A., Letourneau, D. K., ... Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), eaax0121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- Dicks, L. V., Breeze, T. D., Ngo, H. T., Senapathi, D., An, J., Aizen, M. A., Basu, P., Buchori, D., Galetto, L., Garibaldi, L. A., Gemmill-Herren, B., Howlett, B. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Johnson, S. D., Kovács-Hostyánszki, A., Kwon, Y. J., Lattorff, H. M. G., Lungharwo, T., Seymour, C. L., ... Potts, S. G. (2021). A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution*, 5(10), 1453–1461. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01534-9>
- Garibaldi, L. A., Carvalheiro, L. G., Vaissière, B. E., Gemmill-Herren, B., Hipólito, J., Freitas, B. M., Ngo, H. T., Azzu, N., Sáez, A., Åström, J., An, J., Blochtein, B., Buchori, D., García, F. J. C., Oliveira da Silva, F., Devkota, K., Ribeiro, M. F., Freitas, L., Gaglianone, M. C., ... Zhang, H. (2016). Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science*, 351(6271), 388–391. <https://doi.org/10.1126/science.aac7287>
- IPBES. (2016). The assessment report on pollinators, pollination and food production. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402856>
- Katumo, D. M., Liang, H., Ochola, A. C., Lv, M., Wang, Q.-F., & Yang, C.-F. (2022). Pollinator diversity benefits natural and agricultural ecosystems, environmental health, and human welfare. *Plant Diversity*, 44(5), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.01.005>
- Kleijn, D., Winfree, R., Bartomeus, I., Carvalheiro, L. G., Henry, M., Isaacs, R., Klein, A.-M., Kremen, C., M'Gonigle, L. K., Rader, R., Ricketts, T. H., Williams, N. M., Lee Adamson, N., Ascher, J. S., Báldi, A., Batáry, P., Benjamin, F., Biesmeijer, J. C., Blitzer, E. J., ... Potts, S. G. (2015). Delivery of crop pollination services is an insufficient argument for wild pollinator conservation. *Nature Communications*, 6, 7414. <https://doi.org/10.1038/ncomms8414>
- Miñarro, M., García, D., & Martínez-Sastre, R. (2018). Los insectos polinizadores en la agricultura: Importancia y gestión de su biodiversidad. *Ecosistemas*, 27(2), 81–90. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1394>
- Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H. T., Aizen, M. A., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., Dicks, L. V., Garibaldi, L. A., Hill, R., Settele, J., & Vanbergen, A. J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632), 220–229. <https://doi.org/10.1038/nature20588>
- Prendergast, K. S., Menz, M. H. M., Dixon, K. W., & Bateman, P. W. (2020). The relative performance of sampling methods for native bees: An empirical test and review of the literature. *Ecosphere*, 11(5), e03076. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3076>
- Rader, R., Bartomeus, I., Garibaldi, L. A., Garratt, M. P. D., Howlett, B. G., Winfree, R., Cunningham, S. A., Mayfield, M. M., Arthur, A. D., Andersson, G. K. S., Bommarco, R., Brittain, C., Carvalheiro, L. G., Chacoff, N. P., Entling, M. H., Foully, B., Freitas, B. M., Gemmill-Herren, B., Ghazoul, J., ... Woyciechowski, M. (2015). Non-bee insects are important contributors to global crop pollination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(1), 146–151. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517092112>
- Roswell, M., Dushoff, J., & Winfree, R. (2021). A conceptual guide to measuring species diversity. *Oikos*, 130(3), 321–338. <https://doi.org/10.1111/oik.07202>

- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., Kremen, C., van der Heijden, M. G. A., Liebman, M., & Hallin, S. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45), eaba1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Woodcock, B. A., Garratt, M. P. D., Powney, G. D., Shaw, R. F., Osborne, J. L., Soroka, J., Lindström, S. A. M., Stanley, D., Ouvrard, P., Edwards, M. E., Jauker, F., McCracken, M. E., Zou, Y., Potts, S. G., Rundlöf, M., Noriega, J. A., Greenop, A., Smith, H. G., Bommarco, R., ... Pywell, R. F. (2019). Meta-analysis reveals that pollinator functional diversity and abundance enhance crop pollination and yield. *Nature Communications*, 10, 1481. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09393-6>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Joaquín Alberto Saucedo Zamora (JASZ)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (JASZ)

Curación de datos: (JASZ)

Análisis formal: (JASZ)

Adquisición de fondos: (JASZ)

Investigación: (JASZ)

Metodología: (JASZ)

Administración del proyecto: (JASZ)

Recursos: No aplica

Software: (JASZ)

Supervisión: (JASZ)

Validación: (JASZ)

Visualización: (JASZ)

Redacción – Borrador original: (JASZ)

