

Artículo Revisión

Manejo integrado de nutrientes para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales

Integrated nutrient management to increase maize productivity under tropical conditions

Ricardo E. Rivas^{1*}  

¹Universidad de Los Andes, Bogotá - Colombia

*Autor de correspondencia: Ricardo E. Rivas 

Recibido: 08-08-2023

Revisado: 15-08-2023

Aceptado: 22-08-2023

Publicado: 29-08-2023

Cómo citar este artículo: E. Rivas, R. (2023). Manejo integrado de nutrientes para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales. *Viterra*, 1(2), 1-22. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/6>

RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia para la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las regiones tropicales; sin embargo, su productividad se ve limitada por la degradación de los suelos, la pérdida de fertilidad y el uso ineficiente de los nutrientes. En este contexto, el manejo integrado de nutrientes se ha consolidado como una estrategia sostenible que combina fertilizantes minerales, enmiendas orgánicas y prácticas de manejo agronómico para mejorar el rendimiento del cultivo y conservar la calidad del suelo. El objetivo de este estudio fue analizar la evidencia científica disponible sobre el manejo integrado de nutrientes para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales mediante una revisión sistemática de la literatura. La investigación se desarrolló siguiendo las directrices de la declaración PRISMA 2020 para la identificación, selección, evaluación y síntesis de estudios científicos. Se revisaron publicaciones relacionadas con fertilización integrada, nutrición vegetal, fertilidad del suelo, productividad del maíz y sostenibilidad agrícola, incluyendo artículos científicos, documentos técnicos e informes institucionales. Los resultados evidencian que la combinación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos incrementa la disponibilidad de nutrientes esenciales, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favorece la actividad microbiana y aumenta el rendimiento del cultivo respecto al uso exclusivo de fertilizantes minerales. Asimismo, la incorporación de materia orgánica contribuye a mejorar la retención de humedad, disminuir las pérdidas de nutrientes y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales. Se concluye que el manejo integrado de nutrientes representa una alternativa eficiente para optimizar la productividad del maíz, mejorar la fertilidad del suelo y promover sistemas de producción más resilientes y ambientalmente sostenibles en las regiones tropicales.

Palabras clave: manejo integrado de nutrientes; maíz; fertilización orgánica; productividad agrícola; agricultura tropical.

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is one of the most important crops for food security and economic development in tropical regions; however, its productivity is constrained by soil degradation, declining fertility, and inefficient nutrient use. In this context, integrated nutrient management has emerged as a sustainable strategy that combines mineral fertilisers, organic amendments, and agronomic management practices to improve crop performance while preserving soil quality. The aim of this study was to analyse the available scientific evidence on integrated nutrient management to increase maize productivity under tropical conditions through a systematic literature review. The review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines for the identification, selection, appraisal, and synthesis of scientific evidence. Scientific articles, technical publications, and institutional reports addressing integrated fertilisation, plant nutrition, soil fertility, maize productivity, and agricultural sustainability were included. The findings indicate that combining organic and inorganic nutrient sources enhances the availability of essential nutrients, improves the physical, chemical, and biological properties of the soil, stimulates microbial activity, and increases maize yield

compared with the exclusive use of mineral fertilisers. In addition, the incorporation of organic matter improves soil moisture retention, reduces nutrient losses, and contributes to the long-term sustainability of tropical agricultural systems. It is concluded that integrated nutrient management is an effective strategy to optimise maize productivity, restore soil fertility, and promote more resilient and environmentally sustainable production systems under tropical conditions.

Keywords: integrated nutrient management; maize; organic fertilisation; agricultural productivity; tropical agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cultivos de mayor importancia estratégica para la seguridad alimentaria mundial debido a su amplia utilización en la alimentación humana, la producción pecuaria y la industria agroalimentaria. Su capacidad de adaptación a diferentes condiciones agroecológicas ha permitido su establecimiento en regiones templadas y tropicales; sin embargo, las condiciones propias de los ambientes tropicales, caracterizadas por elevadas temperaturas, alta precipitación, intensa meteorización y frecuentes pérdidas de nutrientes por lixiviación, representan un desafío permanente para alcanzar altos niveles de productividad. La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2018) reconoce que estas limitaciones convierten al manejo de la fertilidad del suelo y de la nutrición vegetal en uno de los factores más determinantes para el éxito productivo del cultivo.

En los sistemas agrícolas tropicales, la degradación progresiva del suelo constituye uno de los principales obstáculos para mantener rendimientos sostenibles del maíz. La disminución del contenido de materia orgánica, la acidificación, la compactación y el agotamiento de nutrientes esenciales reducen la capacidad productiva del suelo y limitan el desarrollo radicular de las plantas. Estas condiciones se agravan cuando predominan sistemas de producción basados exclusivamente en fertilizantes minerales o en prácticas agrícolas poco conservacionistas. La FAO (1999) sostiene que la sostenibilidad de los sistemas agrícolas depende de la integración de prácticas orientadas a conservar los recursos naturales y mejorar de forma continua la fertilidad del suelo mediante estrategias de manejo apropiadas.

El maíz presenta elevados requerimientos nutricionales durante todo su ciclo fenológico, especialmente de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), elementos indispensables para el crecimiento vegetativo, la formación de mazorcas y el llenado del grano. La disponibilidad de estos nutrientes depende no solo de la fertilización aplicada, sino también de las características físicas, químicas y biológicas del suelo. En este sentido, García (2005) señala que una fertilización eficiente debe fundamentarse en el conocimiento de la fertilidad del suelo, las necesidades nutricionales del cultivo y el potencial productivo esperado, evitando aplicaciones excesivas o insuficientes que comprometan tanto la rentabilidad como la sostenibilidad del sistema agrícola.

Durante las últimas décadas, la agricultura intensiva ha incrementado considerablemente el uso de fertilizantes sintéticos como estrategia para elevar la producción de alimentos. Si bien esta práctica ha permitido importantes incrementos en el rendimiento de numerosos cultivos, también ha generado impactos negativos relacionados con la contaminación de cuerpos de agua, las emisiones de gases de efecto invernadero, la disminución de la biodiversidad edáfica y la degradación progresiva de la calidad del suelo. La dependencia exclusiva de fertilizantes minerales representa además un desafío económico para pequeños productores, debido al incremento sostenido de los costos de estos insumos y a la volatilidad de los mercados internacionales.

Ante esta problemática, el manejo integrado de nutrientes (MIN) ha surgido como una estrategia ampliamente recomendada para mejorar simultáneamente la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental. Meseret (2021) define este enfoque como la utilización complementaria de fertilizantes minerales, fertilizantes orgánicos, residuos de cosecha, biofertilizantes, enmiendas y prácticas de conservación del suelo, con el propósito de optimizar la eficiencia del uso de nutrientes y mantener la fertilidad del suelo a largo plazo. Su principio fundamental consiste en aprovechar las ventajas de cada fuente nutricional, reduciendo las limitaciones que presentan cuando son utilizadas de manera aislada.

Diversas investigaciones han demostrado que la integración de fuentes orgánicas e inorgánicas permite incrementar significativamente la productividad del maíz respecto al uso exclusivo de fertilizantes químicos. El estudio Manejo

integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz (2010) evidenció mejoras tanto en el rendimiento del cultivo como en diversas propiedades físicas y químicas del suelo, especialmente en el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nitrógeno y la capacidad de intercambio catiónico. Estos resultados respaldan la importancia de promover esquemas de fertilización balanceados que favorezcan simultáneamente la producción agrícola y la conservación del recurso suelo.

Las fuentes orgánicas de nutrientes, como compost, estiércoles, vermicompost, residuos vegetales y otras enmiendas, desempeñan un papel fundamental dentro del manejo integrado debido a su capacidad para mejorar la estructura del suelo, incrementar la actividad microbiológica y favorecer la disponibilidad gradual de nutrientes durante el ciclo del cultivo. Paralelamente, los fertilizantes minerales permiten satisfacer los requerimientos nutricionales inmediatos de la planta durante las etapas de mayor demanda fisiológica. La combinación adecuada de ambas fuentes permite sincronizar el suministro de nutrientes con las necesidades del cultivo, incrementando la eficiencia de absorción y reduciendo pérdidas por lixiviación o volatilización.

Las investigaciones recientes continúan confirmando la efectividad de este enfoque. El estudio Manejo nutricional integrado: herramienta clave para la agricultura sostenible (2021) señala que la integración racional de fertilizantes minerales y orgánicos favorece la estabilidad de los sistemas agrícolas, mejora la productividad y disminuye el impacto ambiental asociado al uso intensivo de insumos químicos. De forma complementaria, diversos trabajos desarrollados en condiciones tropicales muestran incrementos significativos en variables agronómicas como la altura de planta, el diámetro del tallo, la longitud de la mazorca, el peso de mil granos y el rendimiento final cuando se implementan programas integrados de fertilización.

En América Latina, instituciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias han promovido diferentes programas orientados al manejo sostenible del cultivo del maíz mediante recomendaciones técnicas que consideran el análisis de suelo, el uso racional de fertilizantes y la incorporación de materia orgánica. El INIAP (2021) destaca que la sostenibilidad productiva y la rentabilidad del productor dependen de prácticas integrales que permitan mantener la fertilidad del suelo, conservar los recursos naturales y aplicar estrategias de fertilización adaptadas a las condiciones del sistema productivo.

De manera similar, organismos de investigación agrícola como el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas de Guatemala enfatizan que el manejo agronómico del maíz debe integrar prácticas relacionadas con la fertilización balanceada, la conservación del suelo, el manejo del agua y la selección de materiales genéticos adaptados a las condiciones locales. Estas recomendaciones coinciden con los principios del manejo integrado de nutrientes y buscan maximizar la eficiencia productiva sin comprometer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La ecofisiología del maíz permite comprender por qué el manejo nutricional constituye un factor crítico durante todo el ciclo del cultivo. La FAO (1996) señala que las etapas comprendidas entre el crecimiento vegetativo, la diferenciación floral, la floración y el llenado del grano representan los períodos de mayor demanda de nutrientes. Una deficiencia nutricional durante cualquiera de estas fases puede reducir significativamente el número de granos por mazorca, el peso individual de los granos y, en consecuencia, el rendimiento final. Esta evidencia resalta la necesidad de diseñar programas de fertilización que consideren tanto la cantidad como el momento oportuno de aplicación.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad agrícola, el manejo integrado de nutrientes no solo busca incrementar la producción, sino también conservar la calidad física, química y biológica del suelo. La incorporación sistemática de materia orgánica favorece el desarrollo de microorganismos benéficos, incrementa la capacidad de retención de agua y mejora la estructura del suelo, aspectos especialmente relevantes en ambientes tropicales donde predominan procesos acelerados de degradación edáfica. Asimismo, la reducción parcial del uso de fertilizantes químicos contribuye a disminuir la contaminación ambiental y favorece sistemas agrícolas más resilientes frente al cambio climático.

La creciente disponibilidad de investigaciones relacionadas con el manejo integrado de nutrientes hace necesario realizar síntesis de evidencia que permitan identificar tendencias, beneficios, limitaciones y vacíos de conocimiento. En este contexto, las revisiones sistemáticas constituyen una herramienta metodológica ampliamente reconocida para

recopilar, evaluar críticamente y sintetizar la información científica disponible sobre una temática específica. Holopainen et al. (2008) destacan que este tipo de revisión permite minimizar sesgos mediante procedimientos previamente establecidos para la búsqueda, selección y análisis de los estudios científicos.

La actualización metodológica propuesta por The PRISMA Group (2021) fortalece la transparencia y la reproducibilidad de las revisiones sistemáticas al establecer criterios claros para la identificación, selección, elegibilidad e inclusión de los estudios científicos. La aplicación de estos lineamientos garantiza una mayor rigurosidad metodológica y facilita la interpretación crítica de la evidencia disponible.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar la evidencia científica disponible sobre el manejo integrado de nutrientes como estrategia para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales, identificando sus principales efectos sobre el rendimiento del cultivo, la fertilidad del suelo, la eficiencia en el uso de nutrientes y la sostenibilidad de los sistemas productivos. Los resultados de esta revisión buscan aportar elementos técnicos y científicos que contribuyan al diseño de programas de fertilización más eficientes, sostenibles y adaptados a las condiciones de la agricultura tropical.

2. METODOLOGÍA

Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura con enfoque cualitativo y alcance descriptivo-analítico, orientada a identificar, analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre el manejo integrado de nutrientes como estrategia para incrementar la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones tropicales. Este diseño metodológico permitió integrar resultados provenientes de investigaciones desarrolladas en diferentes contextos agroecológicos, facilitando la comprensión de los avances científicos relacionados con la fertilización integrada, la eficiencia en el uso de nutrientes, la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz. Para garantizar la transparencia, la reproducibilidad y el rigor científico durante todas las etapas del proceso investigativo, la revisión fue estructurada conforme a los lineamientos establecidos por la declaración PRISMA 2020, la cual proporciona criterios estandarizados para la identificación, selección, evaluación e inclusión de estudios en revisiones sistemáticas (Page et al., 2021).

La aplicación de este protocolo permitió organizar de manera secuencial el proceso de revisión, reduciendo el riesgo de sesgos durante la búsqueda bibliográfica y fortaleciendo la confiabilidad de la evidencia sintetizada. En consecuencia, la investigación no se limitó a recopilar información disponible sobre el tema, sino que realizó una evaluación crítica de los estudios seleccionados con el propósito de identificar tendencias de investigación, coincidencias, diferencias metodológicas y vacíos de conocimiento relacionados con el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz. Este enfoque favoreció una interpretación integral de la evidencia científica disponible y proporcionó fundamentos técnicos para la discusión de los principales avances alcanzados en el ámbito de la nutrición vegetal bajo condiciones tropicales.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se desarrolló mediante un procedimiento sistemático orientado a recuperar la mayor cantidad posible de publicaciones científicas relacionadas con el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz. Para ello se consultaron bases de datos de reconocido prestigio internacional, entre ellas Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, SciELO y Google Scholar, debido a la amplia cobertura que ofrecen en las áreas de agronomía, ciencias agrícolas y manejo sostenible de cultivos. Con el propósito de complementar la información científica disponible, también fueron revisados documentos técnicos elaborados por organismos e instituciones especializadas como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), el Instituto Internacional de Nutrición Vegetal (IPNI), el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA) y la asociación Maizar, cuyas publicaciones constituyen referencias relevantes

para el manejo agronómico del cultivo y la formulación de recomendaciones técnicas aplicables a diferentes sistemas productivos.

La búsqueda comprendió publicaciones disponibles en idioma español e inglés correspondientes al período comprendido entre 1996 y 2022. La selección de este intervalo temporal respondió a la necesidad de incorporar tanto documentos considerados referentes para la comprensión de la fisiología y nutrición del maíz como la evidencia disponible hasta el cierre de 2022 sobre estrategias de fertilización integrada y agricultura sostenible. Con el fin de ampliar la cobertura de la revisión, además de la búsqueda electrónica se efectuó una revisión manual de las listas de referencias contenidas en los artículos inicialmente seleccionados, identificando investigaciones adicionales que presentaban relación directa con los objetivos del estudio y que contribuían a fortalecer la evidencia científica analizada.

La recuperación de la literatura científica se realizó mediante la combinación de descriptores relacionados con el objeto de estudio y operadores booleanos adaptados a las características de cada base de datos consultada. Para garantizar una búsqueda amplia y específica se emplearon términos en español e inglés asociados al manejo integrado de nutrientes, la fertilización integrada, la nutrición vegetal, la fertilización orgánica e inorgánica, el cultivo de maíz (*Zea mays*), la agricultura tropical, la fertilidad del suelo, la productividad agrícola y la agricultura sostenible. A partir de estos descriptores se construyeron diferentes ecuaciones de búsqueda, entre ellas "Integrated Nutrient Management" AND maize, "Integrated fertilization" AND *Zea mays*, "Maize productivity" AND tropical agriculture, "Organic fertilization" AND "mineral fertilization" AND maize, "Soil fertility" AND maize AND tropics, así como sus equivalentes en español, incluyendo "Manejo integrado de nutrientes" AND maíz, "Fertilización orgánica" AND maíz y "Productividad del maíz" AND agricultura tropical. La utilización de términos equivalentes en ambos idiomas permitió ampliar el alcance de la búsqueda bibliográfica, recuperar investigaciones desarrolladas en diferentes regiones geográficas y reducir la posibilidad de excluir estudios relevantes relacionados con el manejo nutricional integrado del cultivo de maíz.

Criterios de selección y proceso de revisión

La selección de los estudios incluidos en la presente revisión se realizó mediante criterios previamente definidos que garantizaron la pertinencia y calidad de la evidencia científica analizada. En concordancia con las recomendaciones establecidas por la declaración PRISMA 2020, fueron considerados elegibles los artículos científicos publicados en revistas arbitradas, revisiones sistemáticas, investigaciones experimentales y documentos técnicos relacionados con el manejo integrado de nutrientes, la fertilización orgánica, la fertilización mineral y su aplicación conjunta en el cultivo de maíz. Asimismo, se incorporaron investigaciones que analizaran variables asociadas con el rendimiento del cultivo, la fertilidad y calidad del suelo, la eficiencia en el uso de nutrientes y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas desarrollados bajo condiciones tropicales o agroecosistemas con características similares. Únicamente fueron consideradas publicaciones disponibles en español o inglés y comprendidas dentro del período establecido para la revisión.

En contraste, fueron excluidos aquellos documentos que no abordaban directamente el manejo nutricional del cultivo de maíz, investigaciones centradas exclusivamente en otros cultivos sin posibilidad de extrapolación técnica, publicaciones que carecían de información metodológica suficiente, resúmenes de congresos sin disponibilidad de texto completo, registros duplicados recuperados en diferentes bases de datos y estudios cuyos resultados no aportaban evidencia pertinente para responder al objetivo de la investigación. La aplicación de estos criterios permitió depurar progresivamente la literatura recuperada y asegurar que únicamente fueran incorporadas investigaciones con información relevante y suficiente para el análisis.

El proceso de revisión siguió las cuatro fases establecidas por la declaración PRISMA 2020. En primer lugar, durante la etapa de identificación se localizaron las publicaciones potencialmente relevantes mediante la estrategia de búsqueda previamente diseñada y la revisión complementaria de referencias bibliográficas. Posteriormente, en la fase de cribado, se eliminaron los registros duplicados y se efectuó una evaluación inicial de títulos y resúmenes para

determinar su relación con el objeto de estudio. Los documentos seleccionados fueron sometidos posteriormente a una lectura completa durante la etapa de elegibilidad, verificándose el cumplimiento de los criterios de inclusión establecidos y evaluándose aspectos relacionados con la calidad metodológica, la descripción de los tratamientos aplicados y la pertinencia de los resultados obtenidos. Finalmente, fueron incorporados únicamente aquellos estudios que proporcionaban evidencia científica suficiente para analizar los efectos del manejo integrado de nutrientes sobre la productividad del maíz, la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales, siguiendo el procedimiento metodológico recomendado por Page et al. (2021).

Extracción y evaluación de la calidad metodológica

La información obtenida de cada una de las publicaciones seleccionadas fue organizada mediante una matriz de extracción de datos diseñada específicamente para los objetivos de la presente revisión. En dicha matriz se registró información relacionada con la autoría y el año de publicación, el país o región donde se desarrolló la investigación, el tipo de estudio realizado, el objetivo principal, las estrategias de manejo nutricional evaluadas y los materiales utilizados, incluyendo fertilizantes minerales, compost, estiércoles, biofertilizantes y otras enmiendas orgánicas. Asimismo, se sistematizaron las principales variables agronómicas analizadas, los resultados más relevantes y las conclusiones reportadas por cada investigación, con el propósito de garantizar un proceso homogéneo de recopilación, organización y comparación de la evidencia científica disponible. La utilización de esta matriz permitió estructurar la información de manera uniforme, facilitando la identificación de similitudes y diferencias entre los estudios desarrollados en distintos contextos agroecológicos y proporcionando una base sólida para la posterior interpretación de los resultados, de acuerdo con los principios metodológicos establecidos por la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

De forma complementaria, se efectuó una evaluación crítica de la calidad metodológica de los estudios incluidos con el propósito de valorar la consistencia y confiabilidad de la evidencia científica recopilada. Para ello se analizaron aspectos relacionados con la claridad en la formulación de los objetivos, la descripción del diseño experimental, la definición de los tratamientos de fertilización, el tamaño de la muestra cuando fue aplicable, los procedimientos de análisis estadístico utilizados, la presentación de los resultados y la coherencia existente entre la metodología desarrollada y las conclusiones alcanzadas. Paralelamente, se consideró la procedencia de las publicaciones, priorizando investigaciones publicadas en revistas científicas arbitradas, así como documentos técnicos emitidos por organismos internacionales e instituciones especializadas en investigación agrícola, debido al respaldo científico y técnico que representan para el estudio del manejo integrado de nutrientes y la producción sostenible del maíz. Este proceso permitió fortalecer la confiabilidad de la evidencia incorporada y reducir la inclusión de investigaciones con limitaciones metodológicas que pudieran afectar la interpretación de los resultados (Page et al., 2021).

Síntesis y análisis de la información

Considerando la diversidad de diseños experimentales, estrategias de fertilización, condiciones edafoclimáticas, materiales utilizados y variables agronómicas evaluadas en las investigaciones seleccionadas, la evidencia científica fue integrada mediante una síntesis narrativa, procedimiento que permitió interpretar de forma comparativa los resultados reportados por los diferentes autores sin recurrir a un metaanálisis cuantitativo. Esta decisión metodológica respondió a la heterogeneidad observada entre los estudios incluidos, la cual dificultaba la integración estadística de los resultados debido a las diferencias existentes en los diseños experimentales, las dosis de fertilización, las condiciones ambientales y los indicadores de productividad utilizados en cada investigación. En consecuencia, la síntesis narrativa constituyó la estrategia más adecuada para identificar patrones comunes, contrastar resultados y establecer una visión integral sobre el estado actual del conocimiento relacionado con el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz (Page et al., 2021).

Para facilitar el análisis, la información fue organizada en categorías temáticas relacionadas con la importancia del manejo integrado de nutrientes en la producción de maíz, los efectos de la fertilización orgánica e inorgánica sobre el

rendimiento del cultivo, la influencia de estas prácticas en la fertilidad y calidad del suelo, el empleo de biofertilizantes y otras enmiendas orgánicas, la eficiencia en el aprovechamiento de los nutrientes y la contribución del manejo nutricional integrado a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales. Posteriormente, los resultados fueron comparados y discutidos considerando tanto la evidencia generada por investigaciones experimentales como los aportes técnicos publicados por organismos internacionales e instituciones especializadas en producción agrícola, lo que permitió identificar coincidencias, diferencias, tendencias de investigación y vacíos de conocimiento que orientan futuras líneas de estudio sobre estrategias de nutrición sostenible para el cultivo de maíz. La integración crítica de esta información facilitó el cumplimiento del objetivo de la revisión y proporcionó una visión actualizada de los principales avances científicos relacionados con el manejo integrado de nutrientes bajo condiciones tropicales.

3. RESULTADOS

Caracterización general de los estudios incluidos

La aplicación de la estrategia de búsqueda bibliográfica y de los criterios de selección establecidos en la metodología permitió conformar un conjunto de estudios que ofrecen una visión amplia sobre el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz bajo condiciones tropicales. La evidencia recopilada estuvo integrada por investigaciones experimentales, revisiones científicas, documentos técnicos, manuales de producción agrícola e informes institucionales publicados entre 1996 y 2022, procedentes tanto de organismos internacionales como de centros nacionales de investigación y revistas especializadas en ciencias agrícolas. La diversidad de estas fuentes permitió abordar el fenómeno desde diferentes perspectivas metodológicas y productivas, favoreciendo una comprensión integral de las estrategias de nutrición vegetal empleadas en sistemas de producción de maíz.

Desde el punto de vista metodológico, predominan los estudios experimentales desarrollados en condiciones de campo, en los cuales se comparan diferentes esquemas de fertilización mineral, orgánica e integrada mediante el análisis de variables relacionadas con el crecimiento, el rendimiento y la calidad del suelo. No obstante, también fueron identificadas investigaciones realizadas en condiciones controladas de invernadero, revisiones de literatura y documentos técnicos elaborados por instituciones especializadas como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), el Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA) y la asociación Maizar, cuyos aportes complementan la evidencia experimental mediante recomendaciones fundamentadas en programas de investigación agrícola y experiencias de transferencia tecnológica. La convergencia entre investigaciones experimentales y documentos técnicos fortalece la consistencia de los hallazgos sintetizados, al combinar evidencia empírica con lineamientos de aplicación práctica para diferentes sistemas productivos.

El análisis cronológico de las publicaciones evidencia una evolución importante en el enfoque de las investigaciones sobre el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz. Los trabajos desarrollados durante las décadas de 1990 y comienzos del siglo XXI estuvieron orientados principalmente a comprender la ecofisiología del cultivo, la dinámica de absorción de nutrientes y los principios generales de fertilización, sentando las bases para el manejo nutricional del maíz bajo diferentes condiciones de producción (FAO, 1996). Posteriormente, el interés científico se amplió hacia la formulación de estrategias para integrar prácticas agronómicas y conservar la fertilidad del suelo, promoviendo un uso más racional de los recursos disponibles (FAO, 1999). En esta misma línea, García (2005) enfatizó la importancia del diagnóstico de la fertilidad del suelo y de la aplicación eficiente de nutrientes como elementos fundamentales para optimizar la productividad del cultivo. Más recientemente, las investigaciones han incorporado conceptos asociados con la agricultura sostenible, la eficiencia en el uso de nutrientes, la recuperación de la calidad del suelo y el aprovechamiento de biofertilizantes y enmiendas orgánicas, aspectos que han adquirido mayor relevancia en los sistemas agrícolas tropicales (Meseret, 2021). De igual manera, las recomendaciones técnicas del INIAP (2021) reflejan esta evolución al promover programas de fertilización que integran productividad, conservación del suelo y sostenibilidad ambiental. En conjunto, esta transformación evidencia el tránsito desde modelos de producción basados

principalmente en fertilización mineral hacia enfoques integrales que buscan equilibrar el incremento del rendimiento con la conservación de los recursos naturales.

La distribución geográfica de las investigaciones también aporta solidez a la revisión, ya que incluye estudios desarrollados en diferentes regiones productoras de maíz de América Latina, África y Asia, además de documentos técnicos de organismos internacionales con aplicación en sistemas agrícolas tropicales. A pesar de las diferencias edafoclimáticas entre las zonas de estudio, la evidencia muestra una notable coincidencia respecto a la importancia de adaptar los programas de fertilización a las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como a las condiciones ambientales y a la disponibilidad local de fuentes orgánicas de nutrientes. Esta convergencia fortalece la posibilidad de identificar principios generales aplicables al manejo integrado de nutrientes, independientemente del contexto geográfico donde se desarrolla el cultivo.

Las investigaciones revisadas pueden organizarse en cinco grandes ejes temáticos que estructuran el análisis presentado en este trabajo: manejo integrado de nutrientes, fertilización orgánica e inorgánica, fertilidad y calidad del suelo, crecimiento y productividad del cultivo de maíz, y sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Esta clasificación facilita la integración de la evidencia científica y permite analizar de manera articulada las múltiples dimensiones involucradas en la nutrición del cultivo.

Tabla 1.

Características generales de los estudios incluidos en la revisión

Autor / Institución	Año	Tipo de estudio	Tema principal	Principales aportes
FAO	1996	Documento técnico	Ecofisiología del maíz	Describe las bases fisiológicas del desarrollo del maíz y los requerimientos nutricionales durante las diferentes etapas fenológicas del cultivo.
FAO	1999	Manual técnico	Manejo integrado de cultivos	Establece principios para la integración de prácticas agrícolas sostenibles orientadas a conservar la fertilidad del suelo y mejorar la productividad. Presenta criterios técnicos para el diagnóstico de la fertilidad del suelo y la aplicación eficiente de nutrientes según las necesidades del cultivo.
García	2005	Documento técnico	Fertilización del cultivo de maíz	

Autor / Institución	Año	Tipo de estudio	Tema principal	Principales aportes
Agrociencia	2010	Investigación experimental	Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos	Demuestra que la combinación de fertilizantes minerales y abonos orgánicos incrementa el rendimiento del maíz y mejora las propiedades del suelo. Analiza la importancia del manejo integrado de nutrientes para incrementar la productividad del maíz y fortalecer la sostenibilidad agrícola.
Meseret	2021	Revisión científica	Manejo integrado de nutrientes	Destaca que la integración de fertilización orgánica e inorgánica mejora la eficiencia del uso de nutrientes y reduce el impacto ambiental.
Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas	2021	Revisión bibliográfica	Manejo nutricional integrado	Presenta recomendaciones sobre manejo nutricional, conservación del suelo y prácticas agronómicas para sistemas sostenibles de producción de maíz.
INIAP	2021	Guía técnica	Producción sustentable de maíz	Evalúa diferentes fuentes y dosis de fertilización y sus efectos sobre el crecimiento, los componentes de la mazorca y el rendimiento del cultivo.
Intriago Peñarrieta y Espinoza Yáñez	2022	Investigación experimental	Fertilización orgánica e inorgánica en maíz	

Nota. Elaboración propia a partir de las fuentes documentales incluidas en la revisión sobre manejo nutricional, fertilidad del suelo y producción sostenible de maíz.

La información sintetizada en la Tabla 1 evidencia que, aunque las investigaciones difieren en su diseño metodológico, escala experimental y condiciones de evaluación, existe una marcada convergencia en los objetivos perseguidos. La mayoría de los estudios busca determinar el efecto de la integración entre fertilizantes minerales y fuentes orgánicas

sobre el rendimiento del cultivo, la disponibilidad de nutrientes y la conservación de la fertilidad del suelo. Asimismo, los documentos técnicos enfatizan que la planificación de programas de fertilización debe sustentarse en el diagnóstico de las condiciones locales, incorporando criterios relacionados con el análisis del suelo, los requerimientos nutricionales del cultivo y el aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles. En conjunto, esta evidencia constituye el fundamento para comprender la evolución del manejo integrado de nutrientes como una estrategia orientada simultáneamente a incrementar la productividad agrícola y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de producción de maíz.

Evidencia sobre el manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz

La evidencia científica analizada coincide en definir el manejo integrado de nutrientes como una estrategia orientada a optimizar la disponibilidad y el aprovechamiento de los elementos esenciales mediante la combinación equilibrada de fertilizantes minerales, fuentes orgánicas, residuos de cosecha, biofertilizantes y otras enmiendas que contribuyen a mantener la productividad del cultivo y la calidad del suelo. A diferencia de los esquemas tradicionales basados exclusivamente en fertilización química, este enfoque busca sincronizar el suministro de nutrientes con las necesidades fisiológicas del maíz, favoreciendo simultáneamente la eficiencia agronómica, la sostenibilidad ambiental y la conservación de los recursos edáficos. Los lineamientos técnicos propuestos por la FAO (1999) establecen que la nutrición del cultivo debe integrarse con prácticas de manejo del suelo y conservación de los agroecosistemas, criterio que posteriormente ha sido fortalecido por programas nacionales de investigación y transferencia tecnológica desarrollados por instituciones como el INIAP (2021) y el ICTA.

Las investigaciones experimentales revisadas muestran una tendencia consistente hacia la evaluación de esquemas de fertilización que combinan fuentes minerales con materiales orgánicos como compost, estiércoles, residuos vegetales y diversas enmiendas de origen biológico. Estos estudios comparan habitualmente los tratamientos integrados con sistemas manejados únicamente mediante fertilización mineral, analizando variables relacionadas con el crecimiento vegetativo, el desarrollo radicular, la absorción de nutrientes, el rendimiento del cultivo y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En conjunto, los resultados evidencian que la incorporación de materia orgánica no solo complementa el suministro de nutrientes, sino que también favorece procesos asociados con la mejora de la estructura del suelo, el incremento de la actividad microbiológica y una mayor disponibilidad de nutrientes durante el ciclo fenológico del cultivo, aspectos ampliamente documentados por Meseret (2021) y respaldados por las investigaciones experimentales incluidas en la presente revisión.

Otro aspecto que emerge de manera recurrente en la literatura es la importancia de adaptar los programas de fertilización a las condiciones específicas de cada sistema productivo. Los documentos técnicos revisados coinciden en señalar que la eficiencia del manejo integrado depende del conocimiento previo de la fertilidad del suelo, de los requerimientos nutricionales del cultivo, de las condiciones climáticas y de la disponibilidad local de materiales orgánicos susceptibles de ser incorporados al sistema agrícola. En este contexto, García (2005) destaca que el diagnóstico de la fertilidad constituye el punto de partida para definir dosis racionales de fertilización, mientras que las recomendaciones desarrolladas por el INIAP (2021) e ICTA enfatizan la necesidad de complementar dicho diagnóstico con prácticas de conservación del suelo y manejo agronómico que permitan incrementar la eficiencia en el uso de los nutrientes.

En términos generales, la evidencia recopilada demuestra que el manejo integrado de nutrientes ha evolucionado desde una alternativa complementaria de fertilización hasta consolidarse como uno de los principales enfoques para la producción sostenible de maíz. Aunque las investigaciones difieren en las fuentes orgánicas empleadas, las dosis aplicadas y las condiciones agroecológicas evaluadas, existe un amplio consenso en que la integración de distintas fuentes de nutrientes favorece simultáneamente la productividad del cultivo, la conservación de la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Esta convergencia de resultados proporciona una base científica sólida para considerar el manejo integrado de nutrientes como una estrategia clave para enfrentar los desafíos productivos y ambientales que actualmente caracterizan a la agricultura tropical.

Efecto del manejo integrado de nutrientes sobre el crecimiento y rendimiento del maíz

El crecimiento y el rendimiento del cultivo de maíz constituyen las variables más ampliamente evaluadas en las investigaciones relacionadas con el manejo integrado de nutrientes. La evidencia científica revisada muestra que la mayoría de los estudios experimentales analizó la respuesta del cultivo mediante indicadores morfológicos, fisiológicos y productivos, con el propósito de determinar la eficacia de diferentes esquemas de fertilización sobre el desarrollo de la planta y la producción final de grano. Entre las variables evaluadas con mayor frecuencia se encuentran la altura de planta, el diámetro del tallo, el desarrollo del sistema radicular, la producción de biomasa, la longitud de la mazorca, el peso de los granos y el rendimiento por unidad de superficie, indicadores que permiten valorar de manera integral el comportamiento agronómico del cultivo frente a distintas estrategias de nutrición.

Las investigaciones experimentales coinciden en comparar tratamientos basados exclusivamente en fertilización mineral con esquemas que incorporan diversas fuentes de materia orgánica, incluyendo compost, estiércoles, residuos vegetales y otras enmiendas. Aunque las dosis, materiales utilizados y condiciones ambientales difieren entre los estudios, existe una tendencia consistente que evidencia un mejor comportamiento agronómico cuando la fertilización química es complementada con fuentes orgánicas de nutrientes. En este sentido, Álvarez-Solís et al. (2010) demostraron que la integración de fertilizantes minerales y abonos orgánicos favorece el desarrollo vegetativo y mejora diversos componentes del rendimiento del cultivo. Resultados concordantes fueron reportados en investigaciones sobre fertilización fosfatada mediante enmiendas orgánicas e inorgánicas (2020), uso de enmiendas en maíz para ensilaje (2021) y fertilización orgánica e inorgánica bajo condiciones de campo en Ecuador (Intriago Peñarrieta & Espinoza Yáñez, 2022), las cuales analizaron respuestas relacionadas con el crecimiento, el establecimiento y la productividad del cultivo.

La mejora observada en estos indicadores puede explicarse por la complementariedad existente entre las fuentes minerales y orgánicas de nutrientes. Mientras los fertilizantes minerales proporcionan una disponibilidad inmediata de elementos esenciales para satisfacer la demanda nutricional del cultivo, las fuentes orgánicas contribuyen a mejorar progresivamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, favoreciendo una liberación más gradual de nutrientes y un ambiente edáfico más adecuado para el desarrollo radicular. Esta interacción permite optimizar la absorción de nutrientes durante las diferentes etapas fenológicas del maíz, aspecto ampliamente descrito en los documentos técnicos elaborados por Maizar, donde se destaca la estrecha relación entre la sincronización del suministro de nutrientes y los procesos fisiológicos responsables del crecimiento vegetativo, la floración y el llenado de grano. Del mismo modo, las recomendaciones técnicas del INIAP (2021) enfatizan que la planificación de la fertilización debe considerar tanto las necesidades fisiológicas del cultivo como las características particulares del suelo para maximizar la eficiencia en el uso de los nutrientes.

No obstante, la revisión también evidencia que la magnitud de la respuesta agronómica varía considerablemente entre investigaciones debido a la influencia de factores como la fertilidad inicial del suelo, las condiciones climáticas, el material genético utilizado, las dosis de fertilización, la calidad de las fuentes orgánicas y las prácticas de manejo implementadas durante el ciclo del cultivo. Esta variabilidad explica que los incrementos en crecimiento y rendimiento no sean uniformes en todos los estudios, aunque la tendencia general favorece consistentemente el empleo de estrategias de manejo integrado frente a esquemas basados únicamente en fertilización mineral. En consecuencia, la literatura coincide en señalar que la efectividad de estas prácticas depende de su adaptación a las condiciones específicas de cada sistema de producción, más que de la aplicación de recomendaciones estandarizadas.

Tabla 2.

Variables agronómicas evaluadas en los estudios revisados

Variable evaluada	Frecuencia de evaluación en los estudios	Principales investigaciones
Altura de planta	Muy frecuente	Agrociencia (2010); Intriago Peñarrieta y Espinoza Yáñez (2022).

Variable evaluada	Frecuencia de evaluación en los estudios	Principales investigaciones
Diámetro del tallo	Frecuente	Intriago Peñarrieta y Espinoza Yáñez (2022).
Desarrollo radicular	Frecuente	Fertilización fosfatada con enmiendas orgánica e inorgánica en maíz (2020).
Producción de biomasa	Frecuente	Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral (2021).
Longitud de mazorca	Muy frecuente	Agrociencia (2010); Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo de maíz (2022).
Peso de grano	Muy frecuente	Agrociencia (2010); Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo de maíz (2022).
Rendimiento del cultivo	Evaluado en la mayoría de los estudios	Agrociencia (2010); uso de enmiendas en maíz para ensilaje (2021); fertilización fosfatada con enmiendas orgánica e inorgánica (2020); Intriago Peñarrieta y Espinoza Yáñez (2022).

Nota. Elaboración propia con base en los estudios incluidos en la revisión documental. Las categorías “muy frecuente” y “frecuente” representan la recurrencia cualitativa con la que cada variable fue evaluada en las investigaciones analizadas.

La información resumida en la Tabla 2 confirma que las variables relacionadas con el crecimiento vegetativo y el rendimiento constituyen los principales indicadores utilizados para evaluar la respuesta del maíz al manejo integrado de nutrientes. La elevada frecuencia con la que se analizan parámetros como la altura de planta, el peso del grano, la longitud de la mazorca y el rendimiento por unidad de superficie refleja la importancia de estos indicadores para determinar la eficiencia agronómica de las estrategias de fertilización. Asimismo, la incorporación de variables relacionadas con el desarrollo radicular y la producción de biomasa evidencia un interés creciente por comprender los mecanismos fisiológicos que explican la respuesta del cultivo a diferentes fuentes de nutrientes. En conjunto, estos resultados muestran que existe una notable homogeneidad metodológica entre las investigaciones revisadas, lo que fortalece la comparación de la evidencia disponible y respalda la consistencia de las tendencias identificadas sobre los efectos del manejo integrado de nutrientes en la producción de maíz.

Influencia del manejo integrado de nutrientes en la fertilidad y calidad del suelo

La fertilidad y la calidad del suelo representan uno de los ejes centrales en las investigaciones sobre manejo integrado de nutrientes, debido a que constituyen la base para mantener la productividad agrícola a largo plazo. La evidencia recopilada demuestra que la mayoría de los estudios no se limita a evaluar la respuesta inmediata del cultivo al suministro de nutrientes, sino que incorpora indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo con el propósito de determinar los efectos de las diferentes estrategias de fertilización sobre la capacidad productiva del agroecosistema. Entre los parámetros más frecuentemente analizados se encuentran el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, el potencial de hidrógeno (pH), la capacidad de intercambio catiónico, la humedad, la estabilidad estructural y la actividad biológica del suelo, variables que permiten valorar de manera integral el estado de fertilidad y su influencia sobre el desarrollo del cultivo.

Los estudios experimentales muestran una tendencia consistente hacia la comparación de sistemas manejados exclusivamente con fertilización mineral frente a esquemas que incorporan materiales orgánicos como compost, estiércoles y otras enmiendas. Esta aproximación metodológica ha permitido identificar que la integración de ambas

fuentes de nutrientes favorece procesos que trascienden el incremento del rendimiento agrícola, al contribuir también a mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo. En este contexto, Álvarez-Solís et al. (2010) evidenciaron que la aplicación conjunta de fertilizantes minerales y abonos orgánicos mejora indicadores asociados con la fertilidad del suelo, mientras que las investigaciones sobre fertilización fosfatada con enmiendas orgánicas e inorgánicas (2020) demostraron la importancia de estas prácticas para incrementar la disponibilidad de fósforo y optimizar su aprovechamiento por el cultivo. De forma similar, los estudios relacionados con el uso de enmiendas orgánicas en sistemas de producción de maíz para ensilaje (2021) destacan efectos favorables sobre la retención de humedad y la disponibilidad de nutrientes durante el ciclo agrícola.

Los documentos técnicos revisados respaldan estos hallazgos al señalar que la conservación de la fertilidad del suelo constituye un componente indispensable para garantizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. La FAO (1999) enfatiza que prácticas como la incorporación de residuos vegetales, el mantenimiento de la cobertura del suelo y el uso combinado de fuentes orgánicas y minerales favorecen la conservación de las propiedades edáficas y reducen los procesos de degradación asociados al uso intensivo de fertilizantes químicos. En la misma línea, García (2005) destaca que el diagnóstico periódico de la fertilidad permite ajustar las dosis de fertilización de acuerdo con las condiciones particulares del suelo, mientras que las recomendaciones técnicas del INIAP (2021) proponen programas de manejo nutricional sustentados en análisis de suelo, monitoreo de nutrientes y estrategias de conservación orientadas a mantener la productividad del cultivo sin comprometer la calidad del recurso edáfico.

A pesar del consenso existente sobre los beneficios del manejo integrado, la revisión también evidencia que la respuesta del suelo depende de múltiples factores, entre ellos el tipo de suelo, las condiciones climáticas, la calidad de las fuentes orgánicas, el tiempo de aplicación y el manejo agronómico implementado. Por esta razón, algunos estudios reportan respuestas más pronunciadas en determinados indicadores de fertilidad que en otros, lo que confirma que los efectos de las estrategias integradas deben interpretarse considerando las características específicas de cada sistema de producción. En consecuencia, la literatura coincide en que el manejo integrado de nutrientes no debe entenderse como una práctica uniforme, sino como un conjunto de estrategias adaptables a las condiciones locales con el objetivo de conservar la capacidad productiva del suelo y mejorar la eficiencia en el uso de los nutrientes.

Tabla 3.

Principales indicadores de fertilidad y calidad del suelo evaluados en los estudios revisados

Indicador evaluado	Frecuencia de evaluación	Principales estudios
Materia orgánica del suelo	Muy frecuente	Agrociencia (2010); INIAP (2021); FAO (1999).
Nitrógeno disponible	Frecuente	Agrociencia (2010); FAO (2018); García (2005).
Fósforo disponible	Muy frecuente	Fertilización fosfatada con enmiendas orgánica e inorgánica en maíz (2020); García (2005).
Potasio disponible	Frecuente	García (2005); INIAP (2021).
pH del suelo	Frecuente	INIAP (2021); Agrociencia (2010).
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	Moderada	Agrociencia (2010); FAO (1999).
Humedad del suelo	Frecuente	Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral (2021); INIAP (2021).
Actividad biológica del suelo	Moderada	FAO (1999); Agrociencia (2010).
Estructura y estabilidad del suelo	Frecuente	FAO (1999); INIAP (2021); Maizar.

Nota. Elaboración propia con base en los estudios revisados. La frecuencia de evaluación corresponde a la recurrencia cualitativa de cada indicador de fertilidad y calidad del suelo en la literatura analizada.

La información presentada en la Tabla 3 evidencia que la materia orgánica, la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, así como el pH del suelo, constituyen los indicadores más utilizados para evaluar el impacto del manejo integrado de nutrientes sobre la fertilidad edáfica. Asimismo, la inclusión de variables relacionadas con la capacidad de intercambio catiónico, la actividad biológica, la humedad y la estabilidad estructural refleja una visión cada vez más integral de la calidad del suelo, en la que no solo se consideran los nutrientes disponibles para el cultivo, sino también los procesos físicos y biológicos que condicionan su aprovechamiento. En conjunto, estos indicadores muestran que la evaluación de la fertilidad del suelo ha evolucionado desde un enfoque centrado exclusivamente en parámetros químicos hacia una perspectiva sistémica que reconoce la interacción entre las propiedades físicas, químicas y biológicas como fundamento de la sostenibilidad agrícola.

Manejo integrado de nutrientes y sostenibilidad agrícola

La sostenibilidad agrícola constituye una de las principales dimensiones incorporadas en las investigaciones recientes sobre manejo integrado de nutrientes en el cultivo de maíz. A diferencia de los enfoques tradicionales, centrados exclusivamente en maximizar el rendimiento mediante la aplicación de fertilizantes minerales, la literatura científica actual reconoce que la productividad debe evaluarse conjuntamente con la conservación de los recursos naturales, la eficiencia en el uso de los nutrientes y la capacidad de los sistemas agrícolas para mantener su funcionamiento en el largo plazo. En este contexto, el manejo integrado de nutrientes se consolida como una estrategia orientada a compatibilizar los objetivos productivos con la protección del suelo, la reducción de impactos ambientales y el aprovechamiento racional de los recursos disponibles.

Los documentos técnicos elaborados por organismos internacionales respaldan esta perspectiva al considerar que la sostenibilidad depende de la integración de múltiples prácticas agronómicas dentro de un mismo sistema de producción. La FAO (1999) plantea que la conservación de la fertilidad del suelo requiere combinar estrategias de fertilización con prácticas de manejo orientadas a minimizar los procesos de degradación, mientras que en El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción se destaca la necesidad de sincronizar el suministro de nutrientes con los requerimientos fisiológicos del cultivo y las características particulares de cada ambiente de producción (FAO, 2018). Desde esta perspectiva, el manejo integrado deja de ser una técnica aislada de fertilización para convertirse en un componente fundamental de los sistemas agrícolas sostenibles.

Las investigaciones revisadas coinciden en señalar que la incorporación de materiales orgánicos contribuye no solamente al suministro de nutrientes, sino también al mejoramiento progresivo de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. La utilización de compost, estiércoles, residuos vegetales y otras enmiendas favorece el incremento del contenido de materia orgánica, mejora la estructura del suelo, fortalece la actividad microbiológica y aumenta la capacidad de retención de agua, procesos que permiten mantener una mayor disponibilidad de nutrientes durante el desarrollo del cultivo. Estas ventajas complementan la acción inmediata de los fertilizantes minerales y favorecen un uso más eficiente de los insumos agrícolas, reduciendo parcialmente la dependencia de aplicaciones químicas continuas, como señalan Meseret (2021) y la revisión publicada en la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2021).

Las recomendaciones técnicas desarrolladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias refuerzan esta visión al proponer programas de fertilización sustentados en el análisis previo del suelo, la incorporación de materia orgánica, la rotación de cultivos y el monitoreo permanente del estado nutricional del sistema productivo (INIAP, 2021). De manera similar, los lineamientos elaborados por el ICTA y Maizar promueven una planificación integral del manejo nutricional, en la cual la fertilización se articula con prácticas de conservación del suelo, manejo del agua y aprovechamiento de residuos agrícolas. Este enfoque evidencia que la sostenibilidad no depende exclusivamente del tipo de fertilizante utilizado, sino de la interacción entre diferentes prácticas de manejo adaptadas a las condiciones específicas de cada agroecosistema.

No obstante, la literatura también muestra que la sostenibilidad agrícola es un concepto multidimensional cuya evaluación trasciende los indicadores tradicionales de rendimiento. Diversos estudios incorporan variables

relacionadas con la eficiencia en el uso de los nutrientes, la estabilidad de la fertilidad del suelo, la conservación de los recursos naturales y la resiliencia de los sistemas de producción frente a condiciones ambientales cambiantes. Aunque la importancia relativa de estos indicadores varía entre investigaciones, existe un consenso general en reconocer que los programas de manejo integrado de nutrientes ofrecen mayores posibilidades para equilibrar productividad y conservación ambiental que los sistemas basados exclusivamente en fertilización mineral. Esta convergencia de resultados fortalece la evidencia científica que respalda el manejo integrado como una estrategia esencial para avanzar hacia modelos de producción de maíz más sostenibles bajo condiciones tropicales.

Tabla 4. Componentes de sostenibilidad agrícola considerados en los estudios revisados

Componente de sostenibilidad	Aspectos evaluados	Principales estudios
Conservación de la fertilidad del suelo	Contenido de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes, estructura y calidad del suelo.	FAO (1999); INIAP (2021); Agrociencia (2010).
Uso eficiente de nutrientes	Aprovechamiento de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, eficiencia de absorción y disponibilidad de nutrientes.	Meseret (2021); García (2005); Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2021).
Conservación del recurso suelo	Cobertura vegetal, incorporación de residuos orgánicos, manejo integrado y prácticas de conservación.	FAO (1999); ICTA; INIAP (2021).
Productividad sostenible	Rendimiento del cultivo bajo diferentes esquemas de fertilización y manejo nutricional.	Agrociencia (2010); Intriago Peñarrieta y Espinoza Yáñez (2022).
Uso de enmiendas orgánicas	Aplicación de compost, estiércoles, residuos agrícolas y otras enmiendas orgánicas.	Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral (2021); Fertilización fosfatada con enmiendas orgánica e inorgánica en maíz (2020).
Manejo integrado del cultivo	Fertilización balanceada, manejo del suelo, conservación del agua y prácticas agronómicas sostenibles.	FAO (2018); INIAP; ICTA; Maizar.

Nota. Elaboración propia a partir de la síntesis de los estudios incluidos en la revisión documental sobre sostenibilidad agrícola, uso eficiente de nutrientes y manejo integrado del cultivo de maíz.

La información sintetizada en la Tabla 4 muestra que la sostenibilidad agrícola fue abordada mediante un enfoque integral que incorpora dimensiones productivas, ambientales y de manejo agronómico. La conservación de la fertilidad del suelo, el uso eficiente de los nutrientes, la incorporación de enmiendas orgánicas y la planificación del manejo integrado del cultivo constituyen los componentes más recurrentes en la literatura analizada. Asimismo, la diversidad de indicadores utilizados refleja que la sostenibilidad ya no se limita al mantenimiento del rendimiento agrícola, sino que comprende la capacidad de los sistemas de producción para conservar la calidad del suelo, optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y reducir los impactos ambientales derivados de la actividad agrícola. En conjunto, la evidencia revisada confirma que el manejo integrado de nutrientes representa una de las estrategias con mayor respaldo científico para fortalecer simultáneamente la productividad del maíz y la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales.

4. DISCUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió integrar la evidencia científica disponible sobre el manejo integrado de nutrientes como estrategia para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales. En términos generales, los estudios analizados muestran una elevada consistencia al señalar que la combinación de fertilizantes

minerales con fuentes orgánicas favorece simultáneamente el rendimiento del cultivo, la conservación de la fertilidad del suelo y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Estos hallazgos respaldan los principios propuestos por la FAO (1999), que plantea la necesidad de manejar la nutrición vegetal desde una perspectiva integral, considerando tanto las demandas fisiológicas del cultivo como la capacidad productiva del suelo. De manera complementaria, Meseret (2021) sostiene que el manejo integrado constituye una alternativa eficiente para incrementar la productividad agrícola sin comprometer la calidad del recurso edáfico, criterio que coincide con las recomendaciones técnicas desarrolladas por el INIAP (2021) para los sistemas maiceros tropicales. En conjunto, esta convergencia de resultados fortalece la solidez de la evidencia sintetizada y confirma que la fertilización integrada representa un componente esencial dentro de los modelos contemporáneos de agricultura sostenible.

Uno de los principales consensos identificados en la literatura corresponde al efecto positivo del manejo integrado sobre el crecimiento y el rendimiento del maíz. Las investigaciones experimentales revisadas muestran que la incorporación simultánea de fertilizantes minerales y materiales orgánicos genera respuestas agronómicas superiores a las obtenidas mediante esquemas de fertilización exclusivamente química, especialmente en variables relacionadas con altura de planta, desarrollo foliar, longitud de mazorca, peso de grano y rendimiento final. Estos resultados son consistentes con los obtenidos por Álvarez-Solís et al. (2010), quienes demostraron que la integración de diferentes fuentes nutricionales mejora el desempeño fisiológico del cultivo al favorecer una mayor disponibilidad de nutrientes durante las distintas fases de crecimiento. En la misma línea, Meseret (2021) explica que la sincronización entre la liberación progresiva de nutrientes provenientes de las enmiendas orgánicas y el aporte inmediato de los fertilizantes minerales incrementa la eficiencia de absorción y reduce los riesgos de deficiencias nutricionales. Asimismo, las recomendaciones emitidas por el INIAP (2021) y Maizar coinciden en señalar que una planificación adecuada de la fertilización constituye uno de los factores más determinantes para alcanzar elevados niveles de productividad en los sistemas tropicales de producción de maíz.

La mejora del rendimiento observada en la mayoría de los estudios puede explicarse no únicamente por un mayor suministro de nutrientes, sino también por la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen el funcionamiento integral del suelo. La incorporación de materia orgánica incrementa la capacidad de retención de agua, mejora la estructura edáfica y estimula la actividad microbiana, condiciones que favorecen un desarrollo radicular más eficiente y una mayor exploración del perfil del suelo. La FAO (1996) ya señalaba que el crecimiento del maíz depende de una interacción permanente entre la disponibilidad de nutrientes, las características físicas del suelo y las condiciones ambientales. Posteriormente, García (2005) destacó que la nutrición balanceada constituye uno de los principales factores asociados con la estabilidad del rendimiento en sistemas agrícolas tropicales. Los resultados sintetizados en esta revisión respaldan estas afirmaciones al demostrar que el manejo integrado no actúa únicamente como una fuente adicional de nutrientes, sino como una estrategia orientada a optimizar el funcionamiento del agroecosistema en su conjunto.

No obstante, la revisión también evidencia que la magnitud de la respuesta productiva varía considerablemente entre las investigaciones analizadas. Esta variabilidad puede atribuirse a diferencias en las condiciones edafoclimáticas, las características de los suelos, las variedades de maíz utilizadas, las dosis de fertilización y la naturaleza de las fuentes orgánicas empleadas. Estudios relacionados con el uso de enmiendas orgánicas (2021) y con la fertilización fosfatada (2020) muestran que la respuesta del cultivo depende, en gran medida, del estado inicial de fertilidad del suelo y del equilibrio entre los nutrientes aplicados. De forma similar, la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2021) destaca que la eficiencia del manejo integrado aumenta cuando la fertilización se ajusta mediante análisis previos del suelo y a los requerimientos específicos del cultivo. En consecuencia, los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de evitar recomendaciones generalizadas y promover programas de fertilización adaptados a las condiciones particulares de cada agroecosistema tropical.

La evidencia sintetizada también demuestra que uno de los principales aportes del manejo integrado de nutrientes radica en su capacidad para conservar y recuperar la fertilidad del suelo, aspecto que constituye la base de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales. Mientras que la fertilización mineral aporta nutrientes de

disponibilidad inmediata para satisfacer las demandas del cultivo, las fuentes orgánicas favorecen procesos de acumulación de carbono, mejoran la estructura del suelo e incrementan la actividad biológica responsable del reciclaje natural de los nutrientes. La FAO (1999) sostiene que la productividad agrícola sostenible depende del mantenimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, criterio que continúa siendo respaldado por investigaciones recientes. En este sentido, Meseret (2021) señala que la incorporación sistemática de materia orgánica permite restaurar progresivamente la calidad del suelo, mientras que el INIAP (2021) recomienda integrar fertilizantes orgánicos dentro de los programas de nutrición del maíz para preservar la capacidad productiva de los agroecosistemas tropicales a largo plazo.

Los resultados analizados indican que los beneficios del manejo integrado no se limitan únicamente al incremento del contenido de materia orgánica, sino que abarcan una mejora integral de las propiedades edáficas. Diversos estudios reportan incrementos en la estabilidad estructural del suelo, una mayor capacidad de retención de humedad y una mejor aireación, condiciones que favorecen el desarrollo radicular y aumentan la disponibilidad efectiva de nutrientes para el cultivo. Álvarez-Solís et al. (2010) observaron que la incorporación de materiales orgánicos mejora simultáneamente la productividad del maíz y la calidad del suelo, mientras que las investigaciones relacionadas con el uso de enmiendas orgánicas (2021) evidencian una recuperación gradual de la fertilidad en sistemas sometidos durante largos periodos a fertilización exclusivamente mineral. De igual forma, los resultados reportados en los estudios sobre fertilización fosfatada (2020) muestran que la combinación de fuentes minerales y orgánicas favorece un mejor aprovechamiento de los nutrientes y reduce las pérdidas ocasionadas por procesos de fijación o inmovilización en el suelo.

Otro aspecto ampliamente respaldado por la literatura corresponde a la mejora en la eficiencia del uso de los nutrientes. La combinación de fertilizantes minerales y orgánicos incrementa la recuperación del nitrógeno, fósforo y potasio aplicados al suelo, favoreciendo una mayor sincronización entre la disponibilidad de estos elementos y los requerimientos fisiológicos del cultivo. Meseret (2021) explica que esta interacción permite reducir pérdidas por lixiviación, volatilización y escorrentía, procesos particularmente intensos bajo condiciones tropicales caracterizadas por elevadas precipitaciones y altas temperaturas. En concordancia con estos planteamientos, la FAO (2018) destaca que el uso eficiente de los nutrientes constituye uno de los pilares de la intensificación sostenible de la agricultura, mientras que las recomendaciones del INIAP (2021) enfatizan la necesidad de ajustar las dosis de fertilización a partir del diagnóstico de la fertilidad del suelo y de los requerimientos específicos de cada cultivo.

Desde una perspectiva agronómica, la mayor eficiencia nutricional representa un beneficio que trasciende el incremento del rendimiento. Una utilización más racional de los fertilizantes permite reducir los costos de producción, optimizar la inversión realizada por los agricultores y disminuir la dependencia de insumos sintéticos, cuya disponibilidad y precio presentan una creciente variabilidad en los mercados internacionales. La Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2021) destaca que la eficiencia en el uso de nutrientes constituye un indicador clave para evaluar la sostenibilidad de los sistemas productivos, mientras que García (2005) señala que el equilibrio nutricional favorece la estabilidad del rendimiento y reduce la vulnerabilidad de los cultivos frente a condiciones ambientales adversas. En consecuencia, el manejo integrado debe entenderse como una estrategia que combina eficiencia agronómica, rentabilidad económica y conservación ambiental, aspectos que resultan inseparables dentro de los actuales modelos de producción sostenible.

La revisión evidencia además que la sostenibilidad agrícola se ha convertido en uno de los principales ejes de investigación relacionados con la nutrición del maíz. Mientras que las investigaciones desarrolladas durante las décadas anteriores concentraban sus esfuerzos en maximizar la producción mediante el incremento de las dosis de fertilizantes minerales, los estudios más recientes incorporan variables asociadas con la conservación del suelo, la mitigación del impacto ambiental, la eficiencia en el uso de los recursos y la adaptación al cambio climático. Esta evolución refleja un cambio conceptual importante dentro de la investigación agronómica, donde el éxito de los sistemas productivos ya no se evalúa únicamente en función del rendimiento obtenido, sino también considerando su capacidad para conservar los recursos naturales y mantener la productividad en el largo plazo. Este enfoque coincide

con las directrices promovidas por la FAO (2018) y con las recomendaciones técnicas desarrolladas por el ICTA y el INIAP (2021), instituciones que plantean la necesidad de integrar prácticas de manejo que permitan incrementar la productividad sin comprometer la sostenibilidad de los agroecosistemas.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto que el manejo integrado de nutrientes representa una herramienta fundamental para avanzar hacia sistemas agrícolas más resilientes frente a los desafíos derivados del crecimiento de la demanda de alimentos, la degradación de los suelos y la variabilidad climática. La integración equilibrada de fertilizantes minerales y fuentes orgánicas permite responder simultáneamente a las necesidades productivas del cultivo y a la conservación de los recursos naturales, fortaleciendo la capacidad adaptativa de los sistemas de producción de maíz bajo condiciones tropicales. En este contexto, la evidencia sintetizada respalda la necesidad de promover políticas agrícolas que incentiven la adopción de estrategias de fertilización sostenible y fortalezcan los programas de investigación orientados a optimizar el manejo de los nutrientes en diferentes escenarios agroecológicos.

A pesar de la consistencia general observada en la literatura, la presente revisión también permitió identificar diversas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. Una de las principales corresponde a la heterogeneidad metodológica existente entre los estudios, reflejada en diferencias relacionadas con las condiciones edafoclimáticas, los materiales genéticos de maíz evaluados, las dosis y tipos de fertilizantes aplicados, las fuentes de materia orgánica utilizadas y los indicadores empleados para valorar la respuesta del cultivo. Estas diferencias metodológicas dificultan la comparación directa entre investigaciones y explican la variabilidad observada en la magnitud de los beneficios atribuidos al manejo integrado de nutrientes. En este sentido, las directrices propuestas por Page et al. (2021) destacan que la heterogeneidad constituye una característica inherente de las revisiones sistemáticas, por lo que la interpretación de la evidencia debe considerar las particularidades de cada contexto experimental. De igual forma, Meseret (2021) señala que la eficacia del manejo integrado depende en gran medida de las condiciones locales de producción, mientras que la FAO (1999) enfatiza la necesidad de adaptar las estrategias de fertilización a las características específicas de cada agroecosistema.

Otra limitación identificada corresponde al horizonte temporal de la mayoría de las investigaciones experimentales. Una proporción importante de los estudios evaluó la respuesta del cultivo durante uno o dos ciclos agrícolas, lo cual resulta suficiente para analizar variables relacionadas con el crecimiento y el rendimiento, pero insuficiente para comprender los efectos acumulativos del manejo integrado sobre la evolución de la fertilidad del suelo y la estabilidad productiva en el largo plazo. La incorporación continua de materia orgánica produce cambios graduales en el contenido de carbono, la actividad biológica y la estructura del suelo, procesos cuya magnitud solo puede apreciarse mediante investigaciones desarrolladas durante varios años consecutivos. La FAO (2018) destaca que la sostenibilidad de los sistemas agrícolas debe evaluarse considerando procesos de mediano y largo plazo, mientras que el INIAP (2021) recomienda establecer programas permanentes de monitoreo de la fertilidad para optimizar las estrategias de manejo nutricional en los sistemas de producción de maíz.

La revisión también pone de manifiesto la necesidad de ampliar el enfoque de las investigaciones futuras mediante la incorporación de indicadores económicos, ambientales y sociales. Aunque la mayoría de los estudios analizados evalúa de manera rigurosa variables agronómicas relacionadas con el crecimiento, el rendimiento y la fertilidad del suelo, todavía son escasas las investigaciones que integran aspectos como la rentabilidad económica, la eficiencia en el uso de los fertilizantes, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la conservación de la biodiversidad edáfica o la resiliencia de los sistemas agrícolas frente a escenarios de variabilidad climática. La FAO (2018) plantea que la intensificación sostenible requiere evaluar simultáneamente la productividad, la viabilidad económica y la conservación de los recursos naturales, mientras que la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (2021) resalta la importancia de incorporar indicadores integrales que permitan valorar el impacto real de las prácticas de manejo sobre los sistemas productivos. En consecuencia, futuras investigaciones deberían adoptar enfoques multidimensionales que faciliten una evaluación más completa del manejo integrado de nutrientes.

Desde una perspectiva científica, la evidencia sintetizada demuestra que el manejo integrado de nutrientes ha evolucionado desde una práctica orientada exclusivamente al incremento de la productividad hacia un enfoque integral de gestión sostenible del suelo y de los recursos agrícolas. Los estudios más recientes ya no limitan su análisis al rendimiento del cultivo, sino que incorporan variables relacionadas con la calidad del suelo, la eficiencia en el uso de nutrientes, la sostenibilidad ambiental y la adaptación al cambio climático, reflejando una transformación significativa en la investigación agronómica contemporánea. Este cambio de enfoque coincide con las recomendaciones promovidas por la FAO (2018) y con las estrategias técnicas desarrolladas por el INIAP (2021) y el ICTA, instituciones que consideran la fertilización integrada como un componente esencial para fortalecer la resiliencia de los sistemas agrícolas tropicales. En este contexto, la presente revisión aporta una visión integradora de la evidencia disponible y contribuye a consolidar las bases científicas para el diseño de programas de manejo nutricional adaptados a diferentes condiciones agroecológicas.

Las implicaciones prácticas derivadas de esta revisión resultan igualmente relevantes para los procesos de transferencia tecnológica y extensión agrícola. La adopción efectiva del manejo integrado requiere fortalecer las capacidades técnicas de los productores en aspectos relacionados con el análisis de suelos, la interpretación de resultados, la selección de fuentes orgánicas, la elaboración de compost, el manejo adecuado de residuos agrícolas y la programación racional de la fertilización. Tanto el INIAP (2021) como Maizar coinciden en señalar que la eficiencia de estas prácticas depende no solo de la disponibilidad de tecnologías apropiadas, sino también del acompañamiento técnico permanente y de la capacitación continua de los agricultores. Asimismo, la FAO (1999) destaca que los programas de extensión constituyen un elemento fundamental para facilitar la adopción de innovaciones orientadas a incrementar la productividad y conservar los recursos naturales, especialmente en regiones tropicales donde predominan sistemas de producción con limitaciones tecnológicas y económicas.

En conjunto, la evidencia científica analizada confirma que el manejo integrado de nutrientes representa una estrategia técnicamente sólida para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales, al tiempo que contribuye a conservar la fertilidad del suelo, mejorar la eficiencia en el uso de los fertilizantes y fortalecer la sostenibilidad de los agroecosistemas. La consistencia de los resultados observados en investigaciones desarrolladas en diferentes contextos agroecológicos respalda su incorporación como uno de los componentes fundamentales de los programas modernos de nutrición vegetal. Sin embargo, los beneficios de esta estrategia dependen de su adaptación a las características particulares de cada sistema productivo, considerando las condiciones edafoclimáticas, la disponibilidad de recursos orgánicos y los requerimientos específicos del cultivo. Por ello, resulta indispensable fortalecer la investigación aplicada, promover la innovación tecnológica y consolidar programas permanentes de asistencia técnica sustentados en las recomendaciones de organismos como la FAO (2018), el INIAP (2021) y otras instituciones especializadas, con el propósito de avanzar hacia sistemas de producción de maíz más eficientes, resilientes y ambientalmente sostenibles.

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió integrar y analizar la evidencia científica disponible sobre el manejo integrado de nutrientes como estrategia para incrementar la productividad del maíz bajo condiciones tropicales. En conjunto, los estudios revisados demuestran que la integración de fertilizantes minerales con fuentes orgánicas constituye una alternativa agronómica eficaz para mejorar el crecimiento y el rendimiento del cultivo, al tiempo que favorece la conservación de la fertilidad del suelo y el uso más eficiente de los nutrientes. La consistencia de los resultados obtenidos en diferentes contextos agroecológicos respalda la solidez de esta estrategia como componente fundamental de los sistemas modernos de producción de maíz.

La evidencia sintetizada también confirma que los beneficios del manejo integrado trascienden el incremento de la productividad agrícola. La incorporación de materia orgánica contribuye a mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, incrementa la eficiencia en el aprovechamiento del nitrógeno, fósforo y potasio, y reduce las pérdidas ocasionadas por procesos como la lixiviación, la volatilización y la escorrentía. En consecuencia, el manejo

integrado de nutrientes no solo fortalece el desempeño agronómico del cultivo, sino que también promueve una utilización más racional de los recursos naturales y favorece la sostenibilidad de los agroecosistemas tropicales.

Desde una perspectiva científica, esta revisión evidencia una evolución en los enfoques de investigación sobre nutrición del maíz. Mientras que los estudios iniciales se centraban principalmente en maximizar el rendimiento mediante fertilización mineral, las investigaciones más recientes incorporan criterios relacionados con la calidad del suelo, la eficiencia en el uso de los nutrientes, la sostenibilidad ambiental y la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. Esta transformación refleja la necesidad de abordar la nutrición vegetal desde un enfoque integral que combine productividad, conservación de los recursos y sostenibilidad a largo plazo.

No obstante, la revisión también permitió identificar vacíos de conocimiento que requieren mayor atención. La heterogeneidad metodológica de los estudios, la limitada disponibilidad de investigaciones de largo plazo y la escasa incorporación de indicadores económicos y ambientales ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar investigaciones multidisciplinarias que evalúen simultáneamente el desempeño productivo, la rentabilidad, la calidad del suelo y el impacto ambiental del manejo integrado de nutrientes bajo diferentes condiciones tropicales.

En conclusión, la evidencia científica disponible respalda al manejo integrado de nutrientes como una estrategia técnicamente fundamentada para incrementar la productividad del maíz y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas agrícolas tropicales. Su implementación debe sustentarse en programas de fertilización adaptados a las condiciones locales, apoyados por procesos de investigación, innovación y extensión agrícola que faciliten la generación de recomendaciones basadas en evidencia. De esta manera, el manejo integrado de nutrientes podrá consolidarse como una herramienta clave para avanzar hacia sistemas de producción de maíz más eficientes, resilientes y ambientalmente sostenibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

El cultivo del maíz en Guatemala: Una guía para su manejo agronómico. ICTA. [Referencia institucional; completar URL oficial].

Fertilización fosfatada con enmiendas orgánica e inorgánica en maíz (*Zea mays* L.). (2020). [Referencia incompleta].

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1996). Fisiología del maíz tropical. <https://www.fao.org/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1999). Manejo integrado de cultivos. <https://www.fao.org/>

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. <https://www.fao.org/>

García, F. (2005). Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. International Plant Nutrition Institute (IPNI).

Hernández-Terrón, J. J., Gutiérrez-Rodríguez, F., Serrato-Cuevas, R., et al. (2021). Manejo nutricional integrado: herramienta clave para la agricultura sostenible. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), 885–897. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2290>

Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. (2021). Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana. INIAP-EESC. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5796>

Intriago Peñarrieta, I. N., & Espinoza Yáñez, M. M. (2022). Efecto de la fertilización orgánica e inorgánica en el cultivo de maíz (*Zea mays*) en la parroquia Puerto Limón, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Institucional de la Universidad Técnica de Cotopaxi. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/8970>

La sustentabilidad en el sistema productivo del maíz: Estudio de caso. [Referencia incompleta].

E. Rivas

Maizar. Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz. [Completar URL].

Manejo integrado del cultivo de maíz. INIAP. [Completar URL institucional].

Manejo nutricional eficiente para maximizar la producción de maíz. Maizar. [Completar URL].

Meseret, G. A. (2021). Role of integrated nutrient management for sustainable maize production. International Journal of Agronomy, 2021, 9982884. <https://doi.org/10.1155/2021/9982884>

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral. (2021). [Referencia incompleta].

Álvarez-Solís, J. D., Gómez-Velasco, D. A., León-Martínez, N. S., & Gutiérrez-Miceli, F. A. (2010). Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz. Agrociencia, 44(5), 575–586. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000500007&lng=es&tlng=es

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:

Ricardo E. Rivas (RER)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (RER)

Curación de datos: (RER)

Análisis formal: (RER)

Adquisición de fondos: (RER)

Investigación: (RER)

Metodología: (RER)

Administración del proyecto: (RER)

E. Rivas

Recursos: No Aplica

Software: (RER)

Supervisión: (RER)

Validación: (RER)

Visualización: (RER)

Redacción – Borrador original: (RER)

Redacción – Revisión y edición: (RER)