



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**



**ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA Y**

**VETERINARIA**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Componente práctico del examen de carácter Complexivo, presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito previo para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO**

**TEMA:**

“Importancia del déficit del magnesio en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.)”.

**AUTOR:**

José Daniel Navarrete Tapia.

**TUTOR:**

Ing. Agr. Marlon Yoel González Chica, MSc.

Babahoyo – Los Ríos – Ecuador

2024

## RESUMEN

El arroz (*Oryza sativa* L.) es el alimento básico para la población mundial y el cultivo más importante, si se considera la extensión de la superficie de siembra y la cantidad de personas, que depende de su producción. El objetivo planteado fue definir la importancia del magnesio en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.). El presente documento se desarrolló a través de la recopilación de información diversa con fines de investigación proveniente de diversos sitios web, artículos científicos, fuentes y repositorios bibliográficos que son accesibles a través de plataformas digitales. Las conclusiones determinaron que los síntomas de deficiencia de Mg en plantas, incluye clorosis intervenal y manchas rojas en hojas viejas. Además, los niveles altos de deficiencia de magnesio vuelven onduladas y caedizas debido a la expansión del ángulo entre la lámina y la vaina de la hoja; la clorosis entre las nervaduras se caracteriza por un color amarillo - anaranjado en las hojas inferiores. Entre los métodos que permitan evitar el déficit de magnesio en el cultivo de arroz se tiene la fertilización química, quema de rastrojos, incorporación de residuos al suelo, análisis de suelo, propiedades fisicoquímicas y monitorear los niveles de clorofila, la tasa fotosintética o síntesis de proteínas.

**Palabras claves:** Clorosis, Macroelementos, Fotosíntesis, Producción.

## SUMMARY

Rice (*Oryza sativa* L.) is the basic food for the world's population and the most important crop, considering the extent of the planting area and the number of people, which depends on its production. The objective was to define the importance of magnesium in the cultivation of rice (*Oryza sativa* L.). This document was developed through the compilation of diverse information for research purposes from various websites, scientific articles, sources and bibliographic repositories that are accessible through digital platforms. The conclusions determined that the symptoms of Mg deficiency in plants include interveinal chlorosis and red spots on old leaves. Additionally, high levels of magnesium deficiency make the leaves wavy and drooping due to the expansion of the angle between the leaf blade and sheath; Intervein chlorosis is characterized by a yellow-orange color on the lower leaves. Among the methods that allow avoiding magnesium deficiency in rice cultivation are chemical fertilization, stubble burning, incorporation of residues into the soil, soil analysis, physicochemical properties and monitoring chlorophyll levels, the photosynthetic rate or synthesis of proteins.

**Keywords:** chlorosis, macroelements, microelements, production.

## CONTENIDO

RESUMEN .....	II
SUMMARY .....	III
1. CONTEXTUALIZACIÓN .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación .....	3
1.4. Objetivos del estudio .....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Líneas de investigación.....	4
2. DESARROLLO.....	5
2.1. Marco conceptual .....	5
2.2. Marco metodológico .....	23
2.3. Resultados.....	23
2.4. Discusión .....	24
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	26
3.1. Conclusiones .....	26
3.2. Recomendaciones.....	26
4. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS.....	28
4.1. Bibliografía.....	28
4.2. Anexos.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Síntomas de deficiencia de magnesio en arroz.....	34
Figura 2. Incorporación de rastrojos de la cosecha anterior para incrementar magnesio en la siembra de arroz.....	35

# 1. CONTEXTUALIZACIÓN

## 1.1. Introducción

*Oryza sativa* L., comúnmente conocido como arroz, constituye un alimento fundamental para la población global y representa el cultivo de mayor relevancia, al valorar tanto la extensión de las áreas de siembra como la cantidad de individuos que dependen de su producción. Ocupa la segunda posición en términos de producción tras el trigo y proporciona una mayor cantidad de calorías en comparación con otros cereales. Su cultivo es característico de Asia meridional y oriental, aunque también se lleva a cabo de manera extensiva en África y América, así como en ciertos lugares de Europa meridional, especialmente en las regiones mediterráneas (Aldaz 2024).

En la actualidad, en nuestro país se cultivan diversas variedades de arroz, cuyos rendimientos se ven afectados por la carencia de paquetes tecnológicos. Esta situación ha llevado a la necesidad de desarrollar alternativas que compensen las deficiencias en el sector arrocero, las cuales deben ser evaluadas en ensayos experimentales y pruebas comerciales (Ramírez 2024).

La disminución en el rendimiento del arroz por unidad de superficie constituye uno de los factores que influyen en la producción del cultivo, atribuible a desbalances nutricionales generados por el uso continuo de nitrógeno, fósforo y potasio. Los macronutrientes y micronutrientes han adquirido una relevancia significativa, atribuible a la extracción continuada de nutrientes por los cultivos, lo que conlleva a una disminución de su concentración en el suelo. Esto se ve agravado por la utilización de fertilizantes sintéticos, la implementación de variedades mejoradas que están adaptadas a condiciones de deficiencia y toxicidad, así como al uso intensivo de la tierra que permite la realización de dos o más cosechas anuales. (Paguay 2024).

La planta de arroz necesita diversos nutrientes fundamentales para alcanzar un rendimiento óptimo. Los macroelementos comprenden nitrógeno, fósforo,

potasio, magnesio, azufre, carbono, hidrógeno y oxígeno. Los elementos que se requieren en cantidades reducidas, pero que son igualmente fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, son denominados microelementos. Estos incluyen hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, molibdeno, cloro y silicio (Medina 2022).

A pesar de que el arroz presenta los requerimientos más mínimos de magnesio en comparación con otros cereales, la aplicación de fertilizantes de magnesio en el cultivo de arroz está emergiendo como una práctica común, especialmente en sistemas de producción agrícola de alto rendimiento, como resultado de la deficiencia de magnesio en numerosos suelos. El magnesio desempeña una función fundamental en la calidad del cultivo (Ube 2020).

## **1.2. Planteamiento del problema**

Una de las principales restricciones en los rendimientos y la calidad del arroz (*Oryza sativa* L.) se atribuye a una nutrición inadecuada del cultivo. La reacción de la planta ante la disponibilidad adecuada de todos los nutrientes se manifiesta en una mejora en la calidad del grano y un incremento en los rendimientos. El arroz cultivado ha manifestado síntomas visuales de amarillamiento, lo cual podría estar relacionado con deficiencias nutricionales; sin embargo, el origen exacto de estos síntomas aún no ha sido establecido con certeza (Velasco 2024).

La gestión inadecuada de la fertilización constituye una de las causas que contribuyen a la reducción de los rendimientos. Esto se debe a que el agricultor utiliza predominantemente fertilizantes que contienen nitrógeno, y en contadas ocasiones recurre a formulaciones que incluyen fósforo y potasio (Molina 2023).

La deficiencia de magnesio puede resultar de una disponibilidad insuficiente de este mineral en el suelo o de una disminución en la concentración de magnesio, atribuible a una proporción no óptima de calcio a magnesio en la fracción intercambiable. El índice óptimo de relación entre calcio y magnesio (Ca:Mg) en el arroz, durante el período comprendido entre la encañada y el inicio de la panícula, se sitúa entre 1 y 1,5. Con el fin de prevenir la deficiencia de magnesio, es necesario

que la concentración de Mg en la hoja se encuentre dentro del rango óptimo previamente descrito. La concentración de magnesio en el suelo debe ser superior a 3 cmolc de Mg (Morocho 2023).

Las manifestaciones de lesiones cloróticas severas entre las nervaduras son indicativas de una deficiencia de magnesio en la planta de arroz. En ciertas especies, estas lesiones pueden presentar un matiz violeta. Las hojas más maduras pueden ser las primeras en verse afectadas; sin embargo, si la re-movilización de magnesio (Mg) en estas hojas es considerablemente lenta, las hojas más jóvenes también pueden resultar afectadas.

### **1.3. Justificación**

En la actualidad, se observa una tendencia hacia la incorporación de fertilizantes que contienen nutrientes adicionales, tales como el silicio y el magnesio, lo que conduce a una mejora en el rendimiento y desarrollo de los cultivos.

La actividad óptima de numerosas enzimas presentes en las células vegetales depende de la presencia de magnesio, el cual desempeña un papel esencial en su funcionamiento adecuado. No obstante, la función más destacada de este elemento radica en su papel como átomo central en la estructura de la molécula de clorofila. La clorofila representa el pigmento responsable del color verde en las plantas y es fundamental para la realización del proceso de fotosíntesis. Además, su función es crucial en la activación de diversas enzimas esenciales para el desarrollo de las plantas y en la contribución a la síntesis de proteínas.

El magnesio desempeña múltiples funciones esenciales en las plantas, que incluyen: la fotofosforilación (sinterización de ATP en los cloroplastos, el adenosín trifosfato, que es la principal fuente de energía en los organismos vegetales), la fijación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el proceso de fotosíntesis, la síntesis de proteínas, la formación de clorofila, el transporte de la savia elaborada a través del floema, el particionamiento y la utilización de foto asimilados, así como la foto-oxidación en las hojas.

El presente artículo es significativo dado que proporciona una comprensión sobre la importancia del magnesio en el cultivo de arroz. Este macroelemento desempeña un papel crucial en la síntesis de clorofila, un componente esencial para el proceso de fotosíntesis. Como resultado, su presencia contribuye al aumento del número de granos por panícula y al incremento del peso de los granos, lo que se traduce en una mejora del rendimiento del cultivo de arroz.

#### **1.4. Objetivos del estudio**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Definir la importancia del magnesio en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.).

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Detallar los efectos que causa el déficit de magnesio en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.).
- Establecer métodos que permitan evitar el déficit de magnesio en el cultivo de arroz.

#### **1.5. Líneas de investigación**

La presente investigación está enfocada dentro de los dominios de la Universidad Técnica de Babahoyo de Recursos agropecuarios, ambiente, biodiversidad y biotecnología. En este contexto, específicamente se aborda en la línea de investigación de la Facultad de Ciencias Agropecuarias sobre Desarrollo agropecuario, agroindustrial sostenible y sustentable y en la Sublíneas de la carrera en Agricultura sostenible y sustentable y nutrición vegetal.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. Importancia del cultivo de arroz

El arroz se distingue como uno de los granos que proporciona una significativa cantidad de vitaminas y minerales, además de ser uno de los más consumidos tanto a nivel global como nacional. Su cultivo se extiende por los cinco continentes, y su consumo diario lo convierte en un elemento esencial en el enriquecimiento de diversas culturas (Fernández 2024).

De este modo, este cultivo ha contribuido al fortalecimiento de sociedades desde tiempos antiquísimos y está intrínsecamente vinculado al patrimonio cultural. Además, en numerosos países y culturas, constituye un componente fundamental de la canasta básica (Orozco *et al.* 2020).

Ha actuado como un recurso nutritivo y asequible para comunidades en situación de pobreza en numerosas naciones en desarrollo. Los principales países productores del continente asiático son China, India, Indonesia, Bangladesh y Vietnam. En Europa: Italia, España, Rusia, Grecia y Portugal; en América: Estados Unidos, Brasil, Colombia, Perú y Argentina; y en África: Egipto, Nigeria, Madagascar y Costa de Marfil (Granados *et al.* 2020).

El predominio del arroz como principal cultivo alimentario en Asia puede atribuirse a su mayor productividad en comparación con otros cereales. Esto se debe a que el arroz permite la realización de múltiples cosechas en cada temporada y, además, presenta una mayor productividad por hectárea cultivada en relación con otras fuentes de cereales o carbohidratos (Orozco *et al.* 2020).

En Ecuador, el 95 % de la producción de arroz se concentra en las provincias de Guayas, Los Ríos y Manabí. En este contexto, los cantones que exhiben la mayor producción son Daule, localizado en la provincia del Guayas, y Babahoyo, situado

en la provincia de Los Ríos. Este tipo de cereal puede ser cultivado en una variedad de suelos y ambientes, siendo su éxito o fracaso determinado por la implementación de tecnologías y variedades adecuadas que aseguren rendimientos económicos. Esto es particularmente relevante en contextos desfavorables, los cuales están en aumento debido al cambio climático y a prácticas agrícolas inadecuadas (Hasang *et al.* 2020).

### **2.1.2. Generalidades del magnesio**

El magnesio (Mg) es un componente de diversos minerales, constituyendo aproximadamente el 2% de la corteza terrestre. Este elemento puede presentarse en formas soluble, intercambiable e insoluble; no obstante, su concentración es menor en comparación con la del Calcio y el Potasio. Los minerales ferromagnesianos, tales como el olivino, piroxeno, anfíbol y mica, constituyen las fuentes primordiales de magnesio en las rocas ígneas básicas. Asimismo, se pueden identificar minerales que se originan a partir de los anteriores, denominados minerales secundarios. Entre estos se incluyen la dolomita [ $MgCO_3(CaCO_3)_2$ ], la magnesita ( $MgCO_3$ ), el talco [ $(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ] y el grupo de las serpentininas [ $(Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ] (Lucero 2022).

El magnesio se presenta como un elemento fundamental para las plantas, ya que es necesario para la síntesis de clorofila, el pigmento responsable del color verde en las hojas, y, por ende, juega un papel crucial en el proceso de fotosíntesis. De manera concomitante, el magnesio desempeña una función fundamental en la transferencia de energía dentro de la planta (Martínez 2023).

Este elemento se presenta con frecuencia en la naturaleza, representando aproximadamente el 2,09% de la corteza terrestre, siendo predominante su existencia en combinación con otros elementos. Estas combinaciones se presentan con regularidad en el agua de mar, en los depósitos salinos, en el agua de lagos salinos y en las aguas minerales. Junto con el calcio, este elemento constituye un componente del agua de grifo que afecta su dureza. Los fertilizantes inorgánicos que contienen magnesio se producen con los mismos principios utilizados en la fabricación de fertilizantes a base de potasio (Tabango 2023).

Es de suma importancia ya que desempeña un papel crucial en la síntesis de xantofilas y carotenoides, además de actuar como un activador de diversas enzimas, en particular aquellas implicadas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas (Guija y Guija 2023).

El magnesio, un macroelemento secundario, desempeña diversas funciones fundamentales en los vegetales. Participa en la síntesis de xantofilas y carotenos, compuestos que son cruciales para mantener una turgencia celular óptima, así como en la formación de carbohidratos en las plantas. La función más relevante del magnesio en los organismos vegetales radica en su intervención directa en el proceso de fotosíntesis, que es esencial para la absorción de macro y microelementos del suelo. Además, el magnesio contribuye a la pigmentación verde de las hojas. La deficiencia de este elemento puede restringir significativamente la producción vegetal (Rojas y Giolina 2023).

### **2.1.3. Funciones del magnesio en las plantas**

El magnesio desempeña un papel fundamental en la preservación de la estructura del suelo. Concurrentemente con otros cationes multivalentes, y especialmente con el calcio, el magnesio establece enlaces entre los minerales arcillosos que poseen una carga negativa. En este sentido, resulta beneficiosa una estructura del suelo que sea estable y granular, lo cual previene la compactación. Esto permite que el suelo desempeñe la función de almacenar una considerable cantidad de agua accesible para las plantas, las cuales pueden desarrollar una red radicular eficiente en dicho medio para maximizar la absorción de agua y nutrientes (Armas 2023).

El magnesio constituye un elemento común en diversos minerales, representando aproximadamente el 2% de la corteza terrestre. Sin embargo, la mayor parte del magnesio presente en el suelo (entre el 90% y el 98%) se incorpora a la estructura cristalina de los minerales, lo que implica que no se encuentra directamente disponible para la absorción por parte de las plantas. Las plantas asimilan magnesio de la solución del suelo, la cual se va renovando gradualmente a partir de las reservas presentes en el mismo (Freire 2024).

El magnesio constituye un nutriente esencial para el desarrollo y la salud de las plantas. Es esencial para una amplia variedad de funciones en las plantas, incluyendo su papel en la síntesis de xantofilas y carotenos, así como su función como activador de diversas enzimas, especialmente aquellas involucradas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas. Además, promueve el mantenimiento de una turgencia celular óptima y contribuye a la formación de carbohidratos en el organismo vegetal. Una de las funciones más esenciales del magnesio se halla en el proceso de la fotosíntesis, dado que es un componente fundamental de la clorofila, la molécula responsable de conferir el color verde a las plantas (Diaz 2024).

El magnesio está implicado en numerosos procesos fisiológicos y bioquímicos. Constituye un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y desempeña un papel crucial en los mecanismos de defensa vegetales ante condiciones de estrés abiótico. Un efecto inicial de la deficiencia de magnesio (Mg) en las plantas se manifiesta a través de una distribución alterada de los asimilados entre las raíces y los brotes. Esto ocurre debido a que el suministro de productos fotosintéticos a los órganos sumideros se ve comprometido, lo que provoca una acumulación de azúcares en las hojas fuente (Villavicencio 2023).

El magnesio desempeña múltiples funciones esenciales en las plantas, entre las cuales se pueden destacar las siguientes: 1) Fotofosforilación, que se refiere a la generación de ATP en los cloroplastos, donde el adenosín trifosfato actúa como la principal fuente de energía en las plantas; 2) La fijación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante el proceso de fotosíntesis; 3) La síntesis de proteínas; 4) La formación de clorofila; 5) El transporte a través del floema, que lleva la savia elaborada; 6) El particionamiento y utilización de los fotoasimilados; y 7) La fotooxidación que ocurre en las hojas (Escobar 2021).

Se observa una correlación significativa entre la concentración de magnesio en el suelo y la biomasa radicular de cultivos como frijoles, chícharos y arroz, cultivados en suelos ácidos (oxisoles). La concentración de magnesio (Mg) en el suelo o sustrato se correlaciona positivamente con el desarrollo del sistema radicular de la planta; sin embargo, se observa que niveles excesivamente altos pueden limitar dicho crecimiento (Calderón 2021).

Las plantas requieren nutrientes específicos que son esenciales para su desarrollo completo y para alcanzar rendimientos máximos. Las repercusiones de la deficiencia de estos nutrientes pueden oscilar desde un crecimiento afectado y la decoloración foliar hasta la pérdida de los órganos reproductivos. En todos los casos, se observa una disminución en los rendimientos de las cosechas, lo que implica que las plantas deben absorber magnesio (Mg) en cantidades adecuadas (López *et al.* 2021).

La aplicación adecuada de programas de fertilización del suelo con macroelementos durante las distintas fases de crecimiento del cultivo de maíz promueve una mejora en las condiciones agronómicas del mismo, lo que se traduce en un aumento en la producción. Todas las variables agronómicas mostraron un nivel de significancia, particularmente aquellas relacionadas con la formación del grano. Además, los rendimientos obtenidos son relativamente superiores a los registrados en otros estudios. La eficiencia agronómica se manifestó en su nivel más elevado con la aplicación de una dosis de 138-69-90 kg ha<sup>-1</sup> de N-P-K, lo cual se atribuye a la cantidad superior de nutrientes aportados al suelo (Ramos 2023).

El papel del magnesio en la fisiología vegetal: Para que una planta pueda absorber adecuadamente el magnesio a través de sus raíces, es fundamental que exista una adecuada disponibilidad de humedad en el suelo. El aprovisionamiento de este elemento a las plantas se realiza mediante el transporte por flujo de masa, lo que le confiere una notable movilidad dentro del floema; este proceso permite la translocación del magnesio desde las hojas más envejecidas hacia aquellas de mayor juventud (Cedeño *et al.* 2023).

El mismo autor indica que:

➤ Empleos del magnesio en las plantas

- Es constituyente del núcleo central de la molécula de la clorofila - Participa activamente en las transformaciones del nitrógeno.
- Es necesario en la transferencia del fósforo en la planta.
- Su presencia evita el ennegrecimiento de la papa y a la duración del almacenamiento.

- Es la base estructural de la molécula de clorofila.

➤ Absorción de Magnesio en las Plantas: Los vegetales adquieren el magnesio en forma de ion magnesio, a través de los siguientes procesos:

1. Filtración pasiva

2. "Transferencia y desplazamiento de iones de magnesio desde áreas con alta concentración hacia áreas con menor concentración" (Cedeño *et al.* 2023).

El magnesio se clasifica como un macronutriente que las plantas absorben en su forma iónica ( $Mg^{2+}$ ) a través de sus sistemas radiculares, mediante el transporte por flujo de masa en condiciones de cationes presentes en la solución del suelo. La demanda de magnesio en las plantas se sitúa entre 1,5 y 3,5  $g\ kg^{-1}$  en las estructuras vegetativas, siendo este rango crítico para alcanzar un crecimiento óptimo. Es importante señalar que su absorción puede verse influenciada por la presencia de otros cationes o por condiciones de pH ácido (Casco y Patiño 2021).

Por ejemplo, una elevada relación de Ca/Mg resultará en una menor absorción de magnesio por parte de la planta. Asimismo, debido a la competición entre protones, la carencia de este macronutriente secundario podría intensificarse con la administración de dosis elevadas de potasio (Lucero 2022).

El magnesio constituye un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las principales funciones de este nutriente incluyen su papel primordial, en donde el ion  $Mg^{2+}$  actúa como átomo central en la estructura de la molécula de clorofila en las hojas verdes. La cantidad total de  $Mg^{2+}$  unida a la clorofila está determinada por la disponibilidad de magnesio (Montiel 2024).

Por ejemplo, la proporción oscila entre un 6% en plantas con un suministro elevado y un 35% en aquellas que presentan deficiencias. Para llevar a cabo la biosíntesis de clorofila, el primer paso consiste en la incorporación de  $Mg^{2+}$  en la estructura de porfirina, un proceso que es catalizado por la enzima Mg quelatasa. La activación de esta enzima es dependiente de ATP y magnesio. Asimismo, la liberación de magnesio durante la descomposición de la clorofila requiere la acción

de la clorofilasa, que hidroliza esta molécula a clorofilida y fitol; además, la Mg-quelata produce feofitina y iones  $Mg^{2+}$  (Lucero 2022)

Por otro lado, en condiciones óptimas de suministro de magnesio para el crecimiento, se observa que aproximadamente entre el 10% y el 20% del total presente en las hojas se concentra en los cloroplastos, y menos de la mitad de este porcentaje se asocia con la clorofila. Asimismo, el autor señala que se requiere una mayor concentración de  $Mg^{2+}$  y  $K^+$  en los cloroplastos y el citoplasma para mantener un pH en el rango de 6,5 a 7,5. Este equilibrio es crucial para la síntesis de proteínas y la actividad enzimática dentro de la célula, dado que el magnesio desempeña un papel esencial como elemento intermedio en la asociación de subunidades ribosomales (Peña 2023).

Un proceso fundamental para la biosíntesis de proteínas. En condiciones de deficiencia de  $Mg^{2+}$  o en presencia de altas concentraciones de  $K^+$ , las subunidades se disocian, lo que interrumpe la síntesis de proteínas. Una función significativa del magnesio es su capacidad para facilitar la activación de diversas enzimas, en particular aquellas involucradas en la transferencia de fosfatos, como las fosfatasas y ATPasas, así como en la transferencia de grupos carboxilos, como las carboxilasas (Aquino *et al.* 2023).

El complejo Mg-ATP desempeña el papel de sustrato para las ATPasas y las pirofosfatasas inorgánicas, en lugar del ATP en estado libre, y su estabilidad es evidente a un pH superior a 6. De manera similar, en el proceso de síntesis de ATP en cloroplastos aislados, se registra un incremento notable en la actividad al añadir  $Mg^{2+}$  de forma externa. En contraste, la incorporación de  $Ca^{2+}$  presenta una inhibición significativa en el proceso de fotofosforilación. De manera similar, la fructosa-1,6-bisfosfatasa es una enzima que exhibe una alta dependencia de magnesio, desempeñando una función vital en la regulación de la distribución de los productos de asimilación, en particular entre la biosíntesis de almidón y la exportación de triosafosfatos en los cloroplastos (Lucero 2022).

Una respuesta relevante del magnesio es su habilidad para regular la ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa (RuBisCO) en el estroma de los cloroplastos. La

interacción del ion  $Mg^{2+}$  con la enzima potencia la afinidad ( $K_m$ ) por el sustrato  $CO_2$  y también mejora la velocidad máxima de reacción ( $V_{max}$ ) (Pérez 2023).

La aplicación adicional de magnesio favorece el incremento en la altura de las plantas y ejerce un impacto positivo en la fisiología vegetal, lo que resulta en significativas mejoras en la productividad agrícola. Este componente es esencial para el progreso de la agricultura, dado que su falta puede impactar de manera considerable la productividad vegetal, lo que puede conducir a la generación de frutos de calidad inferior (Arroyo 2022).

El magnesio es un micronutriente fundamental para la calidad de las plantas, ya que desempeña un papel crucial en la activación de diversos sistemas enzimáticos vinculados al metabolismo energético. Además, desempeña un papel como cofactor en el metabolismo del fósforo. La aplicación de fertilizantes que contienen magnesio ha mostrado eficacia, particularmente en lo que respecta a la relación entre calcio y magnesio, la cual impacta el desarrollo de los frutos. Este componente ejerce un impacto considerable en la calidad de los cultivos (Arroyo 2022).

El magnesio (Mg), en combinación con el calcio y el azufre, constituye uno de los tres nutrientes secundarios fundamentales para el desarrollo adecuado y saludable de las plantas. Se categorizan como secundarios en función de su cantidad, y no de su importancia (Calvache y Yuquilema 2024).

El magnesio desempeña un papel fundamental en el metabolismo vegetal, al funcionar como el átomo central en la configuración del pigmento verde presente en las hojas, denominado clorofila. Asimismo, desempeña funciones relevantes como catalizador en el metabolismo de carbohidratos y proteínas durante el proceso de respiración (Sáenz 2022).

Es el único mineral que forma parte de la estructura molecular de la clorofila, desempeñando una función fundamental en el proceso de fotosíntesis, específicamente en la síntesis de carbohidratos, y colaborando en la generación del característico color verde de las plantas (Díaz *et al.* 2022).

Es fundamental para la biosíntesis de carotenoides y otros pigmentos, además de desempeñar una función crucial en el metabolismo de lípidos y compuestos fosforados. Facilita diversas reacciones enzimáticas, incluyendo la fosforilación, un proceso fundamental para la síntesis de compuestos estructurales tales como el ATP y el ADP (Calderón 2021).

El magnesio también favorece el desarrollo de microorganismos beneficiosos para la planta y desempeña un papel esencial en la promoción de la ecología microbiana (Medina 2023).

El magnesio desempeña un papel fundamental como el componente central en la estructura de la molécula de clorofila. Su implicación es esencial en la fijación del dióxido de carbono y en el proceso de síntesis de proteínas, lo que resulta en un efecto considerable sobre el valor nutricional del arroz. El magnesio juega un papel fundamental en la activación de varias enzimas; un suministro adecuado de este mineral se asocia con un aumento en el porcentaje de eficacia durante el proceso de molienda del arroz (Ube 2020).

#### **2.1.4. Efectos que causa el déficit de magnesio en el cultivo de arroz.**

Los altos niveles de deficiencia de magnesio tienen un impacto significativo en la altura de la planta y en la cantidad de tallos presentes. Las hojas presentan una morfología ondulada y tienden a desprenderse debido a la expansión del ángulo formado entre la lámina foliar y la vaina de la hoja. La clorosis intermareales se caracteriza por la aparición de un tono amarillento con matices anaranjados en las hojas localizadas en la parte inferior de la planta (Asturizaga 2024).

En la variedad de arroz analizada, se evidencia una perturbación en el proceso de macollamiento, así como una coloración amarillenta en las hojas, que también presentan ondulaciones y curvaturas. Estos síntomas se consideran los principales indicadores en los cultivos de arroz (Solis 2024).

En situaciones de deficiencia de magnesio (Mg), se evidencia de manera inicial una clorosis intervenal de coloración naranja-amarillenta en las hojas más

maduras. La deficiencia de magnesio puede presentarse también como clorosis en la hoja bandera (Bajaña 2020).

Las deficiencias de magnesio se manifiestan a través de clorosis, comenzando en las hojas más viejas y progresando hacia aquellas más jóvenes, lo que resulta en la pérdida del pigmento verde. De igual forma, se identifican estrías amarillas en las hojas, las cuales se encuentran acompañadas de venas de color verde. Además, las hojas pueden exhibir una curvatura ascendente o hacia los bordes, y se evidencia un debilitamiento en los tallos (Huanca 2023).

La manifestación de clorosis intervenal, evidenciada por el amarillamiento en las hojas senescentes de la planta, representa un indicador claro del estrés ocasionado por la deficiencia de magnesio (Mg). Esta circunstancia sugiere que el magnesio desempeña una función fundamental en una variedad de procesos fisiológicos y bioquímicos, los cuales se ven afectados de manera adversa en situaciones de deficiencia, lo que impacta negativamente en el crecimiento y en la producción global de la planta (Ramos 2023).

Las plantas que sufren de deficiencia de magnesio manifiestan un crecimiento desacelerado, presentan tallos delgados y alargados, además de producir mazorcas de tamaño reducido que albergan granos de dimensiones igualmente mínimas. El magnesio (Mg) exhibe movilidad dentro de las plantas, y en suelos donde la disponibilidad es limitada, se transfiere con facilidad desde las hojas más antiguas hacia las más jóvenes. Los síntomas de deficiencia se evidencian con mayor severidad en las hojas más viejas, donde se manifiestan inicialmente. Se ha observado la presencia de clorosis intervenal de color amarillo claro en la zona central de las hojas maduras. La clorosis se presenta en la porción apical y en la base de las hojas. En general, las hojas más recientes no presentan signos de afectación (Barandiarán 2020).

### **Desarrollo en orden cronológico**

- Durante las primeras tres a cuatro semanas, no se manifiestan síntomas evidentes. La planta muestra un crecimiento positivo, presenta una coloración

verde intensa y manifiesta un estado de salud vigoroso.

- Los primeros indicios de deficiencia se observan en la planta entre la cuarta y la sexta semana de desarrollo. Se pueden observar en las hojas intermedias, ubicadas debajo del cogollo en fase de floración, pequeñas manchas de tonalidad marrón oxidado y/o puntos de un color amarillo difuso o nublado.
- El color de las hojas jóvenes y de las flores en etapas de desarrollo permanece inalterado.
- Se ha evidenciado un aumento tanto en el tamaño como en la cantidad de las manchas de tonalidades marrón y amarillo.
- Los síntomas se presentan de manera difusa en toda la planta, lo que indica una condición patológica de carácter generalizado. Cuando la deficiencia es significativa, también se manifiestan efectos en las hojas jóvenes, lo que resulta en una reducción en la producción de flores (García 2021).

### **Causas de una deficiencia**

- Las raíces se encuentran en un entorno que presenta niveles excesivos de humedad, temperaturas bajas y/o una acidez elevada.
- Una elevada concentración de potasio, amonio y/o calcio (por ejemplo, una significativa presencia de carbonato de calcio en el agua potable o en suelos arcillosos con un alto contenido de calcio) en relación con la concentración de magnesio.
- Un sistema radicular restringido en una planta que presenta una elevada necesidad de nutrientes.
- Una alta electro-conductividad (EC) en el medio de cultivo, lo cual complica el proceso de evaporación (Díaz *et al.* 2022).

Las lesiones cloróticas severas que se presentan entre las nervaduras son características de una deficiencia de magnesio. En ciertas especies, estas lesiones pueden presentar un matiz violeta. Las hojas más antiguas pueden ser las primeras en afectarse; sin embargo, si la re-movilización de magnesio (Mg) desde estas hojas es particularmente tardía, también se pueden ver comprometidas las hojas más jóvenes (Zambrano 2022).

La manifestación de una deficiencia de magnesio se evidencia a través de un amarillamiento de las hojas, conocido como clorosis, lo cual es particularmente notable en las hojas adultas. Este fenómeno está directamente relacionado con la disfunción en el proceso fotosintético de las plantas. La sintomatología asociada a deficiencias en las plantas se caracteriza por un proceso de decoloración que inicia en los bordes de la lámina foliar, avanzando progresivamente hacia el interior entre las nervaduras, circunscribiendo la nervadura central e, ocasionalmente, las nervaduras primarias. En las hojas adultas afectadas, es posible observar áreas que presentan un tono blanquecino, resultado de una reducción en la actividad fotosintética (Faustino 2020).

El síntoma más evidente de una deficiencia de magnesio es la clorosis en las hojas que han alcanzado su plena expansión. La insuficiencia de este macronutriente conlleva a una reducción en la proporción de proteína. Adicionalmente, se observa que la tasa de fotosíntesis por unidad de clorofila o por unidad de área foliar es inferior en las hojas de las plantas que presentan deficiencia de magnesio (Jáuregui 2023).

El mismo autor señala que, no obstante, los síntomas leves y temporales de deficiencia de magnesio durante la fase de crecimiento vegetativo no necesariamente conducirán a un rendimiento inferior, a menos que se produzcan alteraciones irreversibles, como la disminución en el número de granos por mazorca en las especies de cereales. Asimismo, la concentración de almidón en los tejidos de almacenamiento experimentará una disminución en condiciones de deficiencia de magnesio, lo que a su vez impactará negativamente en la exportación de carbohidratos desde la fuente hacia los sitios de sumidero. Este fenómeno se ha observado en el maíz, donde se manifiesta a través de una reducción en el peso del grano (Jáuregui 2023).

Un considerable número de cultivos presenta afectación debido a la carencia de micronutrientes. Una concentración elevada de cationes como el calcio y el potasio en el suelo puede inducir una deficiencia de magnesio, dado que estos elementos actúan como antagonistas (Zambrano 2020).

El magnesio se clasifica como un elemento móvil en las plantas, lo que implica que los síntomas de su deficiencia se manifiestan inicialmente en las hojas más viejas. Estas hojas exhiben un amarillamiento caracterizado por la clorosis intervenal, donde las venas permanecen verdes, y, en etapas posteriores, se observa una necrosis del tejido (Hernández 2022).

En las plantas, el magnesio se distribuye a través de toda la estructura vegetal. En condiciones de deficiencia de magnesio, se observa que la porción verde de las hojas más antiguas se degrada, mientras que el magnesio es trasladado hacia las regiones más jóvenes de las hojas. Esta destrucción se manifiesta a través de la presencia de manchas de color marrón oxidado y/o áreas de color amarillo difuso o nublado localizadas entre los nudos. La extracción de magnesio de las hojas más envejecidas presenta desafíos, ya que este elemento parece estar altamente integrado en la estructura orgánica de la planta. Una leve deficiencia de magnesio tiene un impacto mínimo en el proceso de floración; sin embargo, la fase de desarrollo de las flores puede agravar los signos asociados a dicha deficiencia (Escobar 2022).

#### **2.1.5. Establecer los métodos que eviten el déficit de magnesio en el cultivo de arroz**

##### **Fertilización química**

El cultivo de arroz tiene las necesidades más bajas de magnesio entre los cereales, sin embargo, la fertilización del magnesio en el arroz se está convirtiendo en una práctica habitual ya que se obtienen altos rendimientos, debido al agotamiento del magnesio en muchos suelos (Ube 2020).

La presencia de estos nutrientes en el suelo se encuentra correlacionada con el pH, de manera que la disponibilidad de los mismos incrementa a medida que el pH se eleva. Consecuentemente, en la mayoría de los suelos destinados al cultivo del arroz, cuyo pH se encuentra entre 5,5 y 6,5, se presentan niveles adecuados de magnesio que permiten alcanzar rendimientos económicos satisfactorios. Sin embargo, en experimentos llevados a cabo por INIA, que consistieron en la

aplicación de cal a dosis de 2,000 kg ha<sup>-1</sup>, se ha logrado un aumento en el rendimiento del cultivo, así como una reducción en la proliferación de malezas ciperáceas (Paguay 2024).

Investigaciones indican que, en relación con la aplicación de magnesio (Mg), se determinó que tras aplicar una dosis de 250 kg/ha<sup>-1</sup> de potasio (K) y realizar cinco siembras de arroz, fue necesaria una adición de 6 kg/ha<sup>-1</sup> de Mg para compensar la pérdida de magnesio del suelo causada por el cultivo (Ruiz 2020).

La utilización de fertilizantes que contienen magnesio se asocia con un incremento en las concentraciones de magnesio, nitrógeno y fósforo en los brotes de arroz, además de un aumento en los niveles de potasio y proteína cruda en los granos de arroz. El impacto de la aplicación foliar de fertilizantes de magnesio se manifestó de manera más pronunciada en comparación con la aplicación al suelo. La aplicación de fertilizante de magnesio sobre la superficie foliar desempeña un papel significativo en la mejora tanto del rendimiento como de la calidad del arroz en regiones dedicadas al cultivo de esta planta, incluso en suelos que presentan un contenido de magnesio relativamente elevado (Mundo agropecuario 2024).

En la actualidad, la deficiencia de magnesio en los cultivos representa una problemática extendida y urgente a nivel global, siendo el arroz un cultivo que presenta requerimientos específicos de magnesio. El contenido óptimo de magnesio en el suelo para promover un crecimiento saludable del arroz se establece en 243 mg/kg (Cano 2024).

En el proceso de absorción total de magnesio en la planta de arroz, se observa que el 12.71% de dicho elemento es absorbido desde la emergencia hasta la fase de iniciación de la panícula, mientras que el 87.29% restante es asimilado durante el proceso de maduración (Montiel 2024).

Los fertilizantes a base de magnesio pueden mitigar las disminuciones en el rendimiento atribuibles a la disminución en la aplicación de fertilizantes de nitrógeno y fósforo, al facilitar la absorción de estos nutrientes en el cultivo de arroz. En consecuencia, la utilización de fertilizantes de magnesio se presenta como una

intervención potencialmente eficaz para optimizar la producción de arroz, al tiempo que se disminuyen los niveles de fertilizantes tanto de nitrógeno como de fósforo (Mundo agropecuario 2024).

### **Quema de rastrojos**

El magnesio (Mg) se encuentra presente en los anillos pirrólicos que forman la clorofila, donde ejerce un papel catalítico en las reacciones enzimáticas mediadas por las nitrato-reductasas, así como en otras enzimas autoinducidas que requieren la presencia de molibdeno (Mo). Este componente es asimilado en cantidades reducidas por la planta de arroz. Durante el proceso de incorporación de residuos en pie o la quema de rastrojos, que implica la adición de cenizas al suelo en la preparación del mismo, se restituye una porción significativa del magnesio (Mg) que fue extraído por el cultivo previo de arroz, así como también del potasio (K) (Maciel 2023).

### **Incorporación de residuos al suelo**

En el análisis de la distribución de nutrientes en la planta de arroz, es fundamental considerar tanto el grano como el residuo. Esta dualidad permite estimar los aportes nutricionales derivados de la incorporación de residuos y, a su vez, subraya la relevancia de llevar a cabo esta actividad. Como se evidencia, la integración de residuos de arroz en el suelo facilita el retorno de una parte del potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) que fueron extraídos por el cultivo de arroz previo, lo que contribuye significativamente a la disminución de las necesidades nutricionales del cultivo subsiguiente (Hirzel 2016).

### **Análisis de suelo**

El análisis de suelos constituye una herramienta diagnóstica esencial para la gestión del cultivo de arroz, ya que facilita la evaluación de la fertilidad específica de cada suelo y permite establecer de manera más precisa las dosis de los nutrientes requeridos para la fertilización de este cultivo. Si bien el análisis de suelo proporciona un índice de la disponibilidad de nutrientes y ciertas variables asociadas a la fertilidad

natural del suelo, como el contenido de materia orgánica, existe una correlación directa con los resultados de rendimiento observados en el cultivo (Hirzel 2016).

### **Propiedades fisicoquímicas**

Las elevadas concentraciones de potasio (K) y amonio (NH<sub>4</sub>) tienden a limitar la disponibilidad de magnesio. Los granos de arroz poseen un contenido de magnesio superior al de la paja; sin embargo, presentan concentraciones de potasio y calcio inferiores en comparación con la paja. El arroz cultivado en condiciones de secano exhibe el nivel óptimo de magnesio en el suelo para el desarrollo de la planta, cuando aproximadamente el 10% de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) está saturada con magnesio. En el contexto del cultivo de arroz en suelos húmedos, la aparición de deficiencias de magnesio es poco frecuente; sin embargo, puede ocurrir cuando su concentración desciende por debajo del 3 al 4 por ciento del Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y cuando el pH del suelo es inferior a 5,5. (Bajaña 2020).

El estudio de las características químicas del suelo en relación con el cultivo de arroz es prácticamente equivalente al que se lleva a cabo para suelos que no están sometidos a inundación, con la excepción de la evaluación de la disponibilidad de nitrógeno. Para este último, es necesario llevar a cabo un análisis de mineralización del nitrógeno bajo condiciones parcialmente anaeróbicas, lo que implica la incubación de los suelos en un entorno controlado en cuanto a temperatura y humedad durante un periodo específico (Hirzel 2016).

### **Monitorear los niveles de clorofila, la tasa fotosintética o síntesis de proteínas**

En una investigación que examinó la tasa de crecimiento vegetal, la fotosíntesis, la fijación de CO<sub>2</sub>, la concentración de clorofila, el transporte de electrones fotosintéticos y la concentración de sacarosa en las hojas, los resultados obtenidos fueron concluyentes. Se observó que, antes de que se hicieran evidentes los síntomas de deficiencia, las hojas con carencia de magnesio presentaban ya una elevada concentración de sacarosa. En comparación con plantas que presentaron

un adecuado suministro, este fenómeno fue cuatro veces más pronunciado, lo que sugiere una inhibición en el transporte de sacarosa desde las hojas que experimentan deficiencias (Intagri 2024).

Un estudio adicional en el que se examinó la función del Mg en la nutrición vegetal evaluó parámetros tales como el crecimiento radical y foliar, la concentración y distribución de carbohidratos en los tejidos vegetales, así como el transporte a través del floema en las plantas. Los hallazgos indicaron una inhibición en el crecimiento radical, observable antes de que las plantas exhibieran signos de deficiencia o una reducción en el contenido de clorofila. En consecuencia, la relación entre el 'crecimiento radical' y el 'crecimiento vegetativo' se incrementó en plantas con deficiencia de Mg (Hirzel 2016).

El impacto negativo en las primeras etapas del crecimiento radicular es de suma relevancia debido al papel crucial que desempeña el sistema radicular a lo largo del ciclo de cultivo, lo cual puede comprometer seriamente el rendimiento final. Este fenómeno, denominado 'hambre oculta', implica que las plantas pueden presentar deficiencias significativas antes de manifestar síntomas visibles. Por consiguiente, esperar a que tales síntomas se hagan evidentes constituye un error; se torna imperativo llevar a cabo intervenciones correctivas antes de que dichos signos aparezcan, dado que en muchas ocasiones las consecuencias pueden ser irreversibles (Intagri 2024).

Con respecto a la acumulación de carbohidratos en las hojas maduras que presentan deficiencia de magnesio (Mg), se constató que bajo condiciones de deficiencia de Mg, las hojas poseen entre 4 y 9 veces más sacarosa en comparación con aquellas de plantas que reciben un suministro adecuado de este nutriente. Asimismo, las hojas que presentaron deficiencias exhibieron un contenido superior de almidones. En plantas cultivadas bajo deficiencia de magnesio, sólo se detectó el 1% de los carbohidratos totales en las raíces, mientras que en plantas con un suministro adecuado de magnesio, esta cifra aumentó al 16%. Estos resultados evidencian una reducción en el transporte de azúcares desde el floema hacia otros tejidos vegetales (Intagri 2024).

Los exudados del floema fueron recolectados de plantas de frijol con niveles de magnesio tanto deficientes como adecuados, con el objetivo de investigar la función de este elemento en el transporte de sacarosa desde las hojas. La deficiencia de magnesio tuvo un impacto significativo y temprano en el transporte de sacarosa a través del floema. Se evidenció una correlación inversa entre la concentración de sacarosa en las hojas y la tasa de transporte de sacarosa en el floema durante los primeros 12 días del cultivo, antes de que se manifestaran síntomas visuales significativos (Montiel 2024).

### **Aplicación de *Bacillus cereus***

En evaluación *in vitro* la actividad promotora de crecimiento vegetal de bacterias endófitas aisladas de diferentes tejidos de variedades de arroz se determinó que la población de bacterias endófitas se aisló en medio de cultivo agar R2A, se realizó conteo y se evaluó cualitativamente la capacidad de fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato y producción de sideróforos. Las bacterias endófitas con actividades positivas fueron identificadas mediante secuenciamiento del gen 16S ARNr con 5 juegos de oligonucleótidos específicos para la clase firmicutes, beta-proteobacteria; gamma-proteobacteria; alfa-proteobacteria y actinobacteria. Los resultados del secuenciamiento comprobaron la identidad de *Bacillus cereus* y *B. thuringiensis*, los cuales tienen la capacidad de promover el crecimiento en cultivo de arroz mediante la solubilización de fosfato, fijación de nitrógeno y producción de sideróforos (Barboza *et al.* 2023).

La promoción del crecimiento vegetal por parte de las especies del género *Bacillus* puede ocurrir de forma directa o indirecta. Un efecto directo sobre la promoción del crecimiento vegetal se observa en bacterias rizosféricas que tienen la capacidad de llevar a cabo la fijación biológica del nitrógeno, la solubilización de minerales como el fósforo y la producción de hormonas reguladoras del crecimiento vegetal. Por su parte, la forma indirecta de promoción del crecimiento vegetal está relacionada con la producción de sustancias que actúan como antagonistas de patógenos o induciendo resistencia en las plantas de arroz (Tejera *et al.* 2021).

## **2.2. Marco metodológico**

El presente trabajo, sustentado en un enfoque práctico, fue elaborado mediante la recopilación de información variada con propósitos de investigación, obtenida de múltiples sitios web, artículos científicos, fuentes y repositorios bibliográficos accesibles a través de plataformas digitales.

La información fue recopilada mediante la aplicación de técnicas de análisis, síntesis y resumen, con el fin de desarrollar contenido específico que se alinee con los objetivos de esta investigación, destacando de esta manera los fundamentos generales que favorecen su aceptación tanto en el ámbito académico como social.

## **2.3. Resultados**

Los hallazgos indican que los síntomas asociados a la deficiencia de magnesio (Mg) en las plantas incluyen la clorosis intervenal y la aparición de manchas rojas en las hojas más antiguas.

Asimismo, se observan que los altos niveles de deficiencia de magnesio inducen a que las hojas adopten una forma ondulada y se tornen quebradizas, lo cual se debe a la ampliación del ángulo existente entre la lámina y la vaina de la hoja. La clorosis internervial se manifiesta mediante una coloración amarilla-anaranjada en las hojas basales.

El cultivo de arroz presenta requerimientos específicos de magnesio. La concentración óptima de magnesio en el suelo para favorecer un crecimiento saludable del arroz se establece en 243 mg/kg.

Es necesario incluir el proceso de quema de rastrojos, que implica la incorporación de cenizas al suelo, en las prácticas de preparación del suelo, ya que este método contribuye en gran medida a la devolución del magnesio extraído por el cultivo anterior de arroz.

La adición de residuos de arroz al sustrato terrestre facilita el retorno de una porción de magnesio que fue extraído durante la cosecha anterior.

El análisis del suelo constituye una herramienta de diagnóstico esencial para la gestión del cultivo de arroz, dado que permite establecer de manera más precisa las dosis de los diversos nutrientes que intervienen en la fertilización de dicho cultivo.

El arroz de secano exhibe un nivel óptimo de magnesio en el suelo para el crecimiento de la planta cuando aproximadamente el 10% de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) se encuentra saturada con magnesio.

Es imperativo llevar a cabo la vigilancia de los niveles de clorofila, la tasa de fotosíntesis y la síntesis de proteínas. Existen investigaciones que evidencian que las hojas con deficiencia de magnesio presentan una concentración elevada de sacarosa.

## **2.4. Discusión**

Los síntomas asociados con la deficiencia de magnesio (Mg) en las plantas comprenden la clorosis interveinal y la aparición de manchas rojizas en las hojas más antiguas. La deficiencia de magnesio provoca que las hojas se presenten onduladas y caídas. La clorosis en la región interveinal se caracteriza por un tono amarillento-anaranjado en las hojas inferiores, coincidiendo con lo señalado por Asturizaga (2024), quien indica que altos niveles de deficiencia de magnesio afectan tanto la altura de la planta como el número de tallos. La clorosis interveinal se distingue por la manifestación de un color amarillo anaranjado en las hojas basales.

El contenido óptimo de magnesio (Mg) en el suelo para fomentar un crecimiento saludable del arroz es de 243 mg/kg. La práctica de la quema de rastrojos facilita la incorporación de cenizas al suelo durante la preparación de este, lo que contribuye al retorno de una parte significativa del Mg extraído por el cultivo de arroz precedente, junto con la adición de residuos orgánicos al terreno. Este hallazgo es respaldado por la investigación publicada por Mundo Agropecuario

(2024), la cual indica que la aplicación de fertilizantes que contienen magnesio incrementa los niveles de este mineral. El impacto de la aplicación foliar de fertilizantes que contienen magnesio resultó ser más pronunciado en comparación con la dotación del mismo fertilizante a través del suelo.

En el caso del arroz de secano, se ha observado que el nivel óptimo de magnesio para el desarrollo de la planta se alcanza cuando aproximadamente el 10 % de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) se encuentra saturada con magnesio. Por otro lado, es crucial el monitoreo de los niveles de clorofila, así como la tasa de fotosíntesis o síntesis de proteínas, como lo señala Hirzel (2016) que el análisis de suelo se reafirma como una herramienta diagnóstica fundamental para el manejo agrícola del arroz, ya que posibilita la evaluación de la condición de fertilidad de los suelos y, en consecuencia, permite determinar con mayor precisión las dosis adecuadas de fertilización. Si bien el análisis del suelo proporciona un índice de la disponibilidad de nutrientes y ciertas variables asociadas con la fertilidad natural del suelo (como la materia orgánica), existe una relación directa entre estas métricas y los resultados de rendimiento obtenidos en el cultivo.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1. Conclusiones

Los síntomas asociados con la deficiencia de magnesio en las plantas incluyen clorosis entre las venas y la aparición de manchas rojas en las hojas más maduras.

Las concentraciones elevadas de deficiencia de magnesio influyen negativamente en la altura de la planta y en la cantidad de tallos. La morfología de las hojas presenta características onduladas y caídas como resultado de la expansión del ángulo formado entre la lámina foliar y la vaina de la hoja. La clorosis interrevascular se distingue por la manifestación de un color amarillento-anaranjado en las hojas situadas en las partes basales de la planta.

En la actualidad, la carencia de magnesio en los cultivos representa un reto significativo y urgente a nivel global, siendo el arroz un cultivo que presenta requerimientos específicos de este elemento. La concentración óptima de manganeso en el suelo para promover un crecimiento saludable del arroz se establece en 243 mg/kg.

La práctica de incorporar los residuos en pie o la quema de rastrojos, que implica la adición de cenizas al suelo durante la preparación del terreno, permite la restitución de una cantidad significativa de magnesio (Mg) que se había extraído durante el cultivo de arroz anterior.

La adición de residuos de arroz al suelo facilita el retorno de una fracción del magnesio extraído durante el cultivo de arroz previo, lo que conlleva a una significativa disminución de las necesidades nutricionales del siguiente cultivo.

El análisis de suelo constituye una herramienta diagnóstica esencial para la gestión de cultivos de arroz, puesto que facilita la evaluación de la fertilidad de cada tipo de suelo. Esto permite, a su vez, establecer de manera más precisa las dosis

necesarias de cada uno de los nutrientes involucrados en la fertilización de este cultivo.

Elevadas concentraciones de potasio (K) y amonio (NH<sub>4</sub>) tienden a limitar la disponibilidad de magnesio. El arroz de secano exhibe el nivel óptimo de magnesio en el suelo para su crecimiento cuando aproximadamente el 10% de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) se encuentra saturada con magnesio.

Es fundamental llevar a cabo un seguimiento de los niveles de clorofila, la tasa de fotosíntesis y la síntesis de proteínas, dado que las hojas con deficiencia de magnesio presentan una elevada concentración de sacarosa.

### **3.2. Recomendaciones**

Aplicar de magnesio en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L) 200-400 kg/ha a los 35, 45 y 55 días de la germinación como un macronutriente esencial para el desarrollo del cultivo.

Fomentar la implementación de diversas estrategias en el cultivo de arroz para la identificación temprana de deficiencias de magnesio, con particular énfasis en el análisis de suelo.

Llevar a cabo investigaciones sobre los síntomas y deficiencias asociados a diversos macro y microelementos que deben ser aplicados al cultivo de arroz.

## 4. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

### 4.1. Bibliografía

- Aldaz, O. 2024. *Eficiencia de las prácticas agrícolas en la producción del cultivo de arroz (Oryza sativa L.)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/16098/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000312.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aquino Díaz, J. M., Sermeño García, P. R., Zelaya Sandoval, N. A., Rivera Sanchez, D. S., & Maldonado Santos, C. E. 2023. *Micronutrientes en el menu de atletas de los xxiv Juegos Centroamericanos y del caribe, San Salvador 2023* (Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador). Disponible en <https://oldri.ues.edu.sv/id/eprint/32876/>
- Armas Armas, D. X. 2023. *Evaluación física–química de los suelos de Laguacoto III de la Universidad Estatal de Bolívar* (Bachelor's thesis, Guaranda. Universidad Estatal de Bolívar. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente. Carrera de Ingeniería Agronómica). Disponible en <https://dspace.ueb.edu.ec/handle/123456789/6146>
- Arroyo Ramírez, A. 2022. *Aspersiones de calcio, potasio y magnesio en frutos de tomate injertado como promotores de la producción y calidad nutracéutica*. Disponible en <https://oai.uaaan.mx/xmlui/handle/123456789/48639>
- Asturizaga Lima, M. A. 2024. *Evaluación del efecto de la dolomita sobre las propiedades químicas del suelo del cultivo de café (coffea arabica) en la comunidad Villa Victoria segundo, tercer bando cantón Taipiplaya del municipio Caranavi* (Doctoral dissertation). Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/35520>
- Bajaña Zambrano, A. G. 2020. *Respuesta agronómica del cultivo de arroz (Oryza sativa) a la aplicación de fertilizantes a base de Silicio y Magnesio en la zona de Babahoyo* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2020). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8227>
- Barandiarán Gamarra, M. Á. 2020. *Manual técnico del cultivo de maíz amarillo duro*. Disponible en <https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/1643>
- Barboza García, A., Pérez Cordero, A., Chamorro Anaya, L. (2023). *Bacterias*

- endófitas aisladas de cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) con actividad promotora de crecimiento vegetal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(1), 28-39. Epub July 01, 2023. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n1.2023.1728>
- Calderón Hernández, R. C. 2021. Adiciones suplementarias de Mg y Zn en la producción y calidad de lechuga romana (*Lactuca sativa* L.). Disponible en <https://oai.uaaan.mx/handle/123456789/47759>
- Calvache, J., Yuquilema, J. 2024. *Determinación de la calidad físico-química del suelo, en tres estratos agrícolas, en dos localidades de la provincia Bolívar* (Bachelor's thesis, Guaranda. Universidad Estatal de Bolívar. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Recursos Naturales y del Ambiente. Carrera de Ingeniería Agronómica). Disponible en <https://dspace.ueb.edu.ec/handle/123456789/6903>
- Cano Macias, F. R. 2024. *Efecto Bioestimulante de Trichoderma spp. en el cultivo de Arroz (Oryza Sativa L.)* (Master's thesis). Disponible en <https://repositorio.unemi.edu.ec/handle/123456789/7290>
- Casco Ibarra, G. F., & Patiño Pomavilla, L. R. 2021. Evaluación vertical de los cationes: K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e H<sup>+</sup> en suelos altoandinos de la microcuenca del río Atillo. Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/15340>
- Cedeño, J. S. V., Troya, E. T. T., & Dávila, P. R. G. 2023. Fertilización con magnesio en la morfología, producción y eficiencia de nutriente del plátano barraganete. *RECIAMUC*, 7(3), 111-120. Disponible en <https://reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/1210>
- Díaz Valderramo, N. I. 2024. *Uso de la tecnología en la aplicación de los fertilizantes en el cultivo de arroz (Oryza sativa L)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16054>
- Díaz, T., Cortegaza, L., Partida, L., Zazueta, N. D., & Flores, L. L. C. 2022. Compilación sobre nutrimentos, sustancias donde se les encuentra y síntomas que ocasionan cuando su concentración disminuye en las plantas. *UCE Ciencia. Revista de postgrado*, 10(3). Disponible en <http://uceciencia.edu.do/index.php/OJS/article/view/296>
- Escobar Naranjo, D. M. 2021. *Importancia de las Biomoléculas que se producen en el proceso de la fotosíntesis de las plantas superiores C3 y C4* (Bachelor's

- thesis, BABAHOYO: UTB, 2021). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/9324>
- Escobar Ramírez, E. 2022. Necesidades nutricionales del cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) en sus diferentes etapas fenológicas. Disponible en <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26686/1/250141.pdf>
- Faustino, L. E. 2020. Respuesta de diferentes dosis de óxido de magnesio en el crecimiento de plántulas de palma aceitera (*Elaeis guineensis* jacq) en la zona de Aguaytia. Disponible en <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4800>
- Fernández Chávez, J. E. 2024. *Harina de arroz (Oryza sativa), Garbanzo (Cicer arietinum), Sorgo (Sorghum vulgare) como sustitutos de trigo en la industria panificadora* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16286>
- Freire Vargas, R. 2024. Análisis de las propiedades químicas del suelo en un transecto altitudinal del refugio de vida silvestre Yankay. Disponible en <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21654>
- García Sotomayor, A. D. 2021. Requerimiento nutricional del cultivo de piña (*Ananas comosus*) y su importancia en el rendimiento (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2021). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/9276>
- Granados Sánchez, M. D. R., Galán Figueroa, J., Leos Rodríguez, J. A. 2020. Volatilidad en los precios de los cereales básicos y su impacto en la seguridad alimentaria. México, 1995-2018. *Nósis. Revista de ciencias sociales*, 29(58), 79-105. Disponible en [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2395-86692020000200079&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2395-86692020000200079&script=sci_arttext)
- Guija-Guerra, H., & Guija-Poma, E. 2023. Radicales libres y sistema antioxidante. *Horizonte Médico (Lima)*, 23(2). Disponible en [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1727-558X2023000200013](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1727-558X2023000200013)
- Hasang, E., Medina, R., Cobos, F., Gómez, J. 2020. Sostenibilidad del cultivo del arroz (*Oryza sativa* L.) en la zona de Daule, provincia del Guayas, Ecuador. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 5(4), 1-16. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7634595>

- Hernández Gómez, P. 2022. Evaluar diferentes concentraciones de bicarbonatos en solución nutritiva sobre el cultivo de lechuga orejona cv. Lulú. Disponible en <https://oai.uaaan.mx/handle/123456789/48041>
- Hirzel, J. 2016. Capítulo 16. Fertilización del cultivo de arroz. Disponible en <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68052/Capitulo%2016.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Huanca, J. M. 2023. *Evaluación de dos soluciones nutritivas, en rúcula (Eruca sativa), bajo tres densidades con la técnica hidropónica de raíz flotante en la Estación Experimental de Patacamaya* (Doctoral dissertation). Disponible en <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/35422>
- Intagri. 2024. El Magnesio, un Nutriente Olvidado que Puede Salvar tu Cultivo. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/magnesio-nutriente-olvidado-salvar-cultivo>
- Jáuregui Paz, B. S. 2023. *Deficiencias de macronutrientes en papaya (Carica Papaya L.) bajo condiciones de invernadero* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Disponible en <http://eprints.uanl.mx/25488/1/1080328837.pdf>
- López, M., Mejía, A., Colina, E., Lombeida, E. 2021. Fisiología vegetal: movimiento y transporte de solutos en las plantas. Disponible en <https://libros.cidepro.org/index.php/cidepro/catalog/book/55>
- Lucero Rafael, V. A. D. J. 2022. Fuentes de magnesio y silicio en el rendimiento de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.), bajo condiciones de La Molina. Disponible en <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5575>
- Maciel, S. N. 2023. Manejo sustentable del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) para reducir las emisiones de gases efecto invernadero en la provincia de Corrientes, Argentina. Disponible en <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/33335>
- Martínez, A. S. 2023. Biofortificación con nanofertilizantes de magnesio en frijol: crecimiento, producción y calidad nutricional. Disponible en <https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1006/1265>
- Medina Freire, B. D. 2023. Evaluación del bioestimulante biorma en el crecimiento de plantas de romerillo (*Podocarpus sprucei* Parl.) a nivel de vivero en la Espoch. Disponible en <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19432>
- Medina, R. 2022. Alternativas tecnológicas para mitigar efectos de salinidad en el

- Arroz (*Oryza sativa* L.) en San Jacinto de Yaguachi, Ecuador. Disponible en <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5518>
- Molina, W. 2023. *Implementación tecnológica en el manejo de drones para la fertilización foliar en el cultivo de cacao (Theobroma cacao)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2023). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/15126/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000309.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montiel León, V. D. 2024. *Análisis de curvas de absorción de nutrientes en cultivo de maíz y arroz* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16037>
- Morocho, M. 2023. *Equilibrio catiónico en la productividad del cultivo de tomate de árbol (Solanum betaceum Cav.) variedad amarillo gigante* (Master's thesis). Disponible en <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/40219>
- Mundo agropecuario. 2024. La aplicación foliar de magnesio aumenta el rendimiento del arroz. Disponible en <https://mundoagropecuario.com/la-aplicacion-foliar-de-magnesio-aumenta-el-rendimiento-del-arroz/>
- Orozco, A. Z., Jara, K. M., & Cordero, W. P. 2020. Análisis de la eficiencia de la fertilización mediante el uso de Zeolita natural y *Mucuna pruriens* en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condiciones controladas en microparcels situadas en Parrita, Puntarenas, Costa Rica. *Repertorio Científico*, 23(2), 23-36. Disponible en <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/repertorio/article/view/2985>
- Paguay, K. 2024. Comportamiento agronómico del cultivo de arroz a la aplicación foliar de fosfito. Disponible en <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/PAGUAY%20FERNANDEZ%20KATTY%20MISHEL.pdf>
- Peña Gualpa, A. W. 2023. *Efecto de la fertilización de nitrógeno y magnesio sobre la concentración de clorofila en el híbrido de maíz (Zea mays L.) en la zona de Pueblo Viejo* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2023). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13891>
- Pérez López, J. 2023. Respuestas a estrés abiótico en plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* L.) con la fosfoenolpiruvato carboxilasa 3 (SbPPC3) o con las fosfoenolpiruvato carboxilasa quinasas 1-3 (SbPPCK1-3) silenciadas. Disponible en <https://idus.us.es/handle/11441/143350>

- Ramírez, A. 2024. Efecto de bacteria fijadora de nitrógeno (*Methylobacterium symbioticum*), en dos variedades de arroz, cantón Daule provincia del Guayas. Universidad Agraria del Ecuador. Disponible en <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/RONQUILLO%20NAVARRETE%20NORBERTO%20ANGEL.pdf>
- Ramos Vera, E. 2023. *Eficiencia agronómica del sulfato de magnesio para la emisión foliar del cultivo de maíz (Zea mays L.) en la Parroquia Isla de Bejuca, cantón Baba* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2023). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13906>
- Rojas, Z., & Giolina, L. 2023. Efecto de aplicación de azufre y magnesio en el rendimiento del cultivo de la papa (*Solanum tuberosum*) variedad tumbay distrito de Colpas Provincia de Ambo Región Huánuco. Disponible en <http://45.177.23.200/handle/undac/4083>
- Ruiz Tapia, A. N. 2020. *Efectos del fertilizante edáfico en diferentes dosis, en el cultivo de arroz en el Cantón Babahoyo* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2020). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8202>
- Sáenz Alarcón, M. 2022. Aplicación de nanopartículas de ZnO y de MgO para determinar su efecto en plantas de maíz cultivadas en invernadero. Disponible en <https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/48926>
- Solis Vera, J. A. 2024. *Prácticas agronómicas empleadas para prevenir el acame en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16153>
- Tabango Guerrero, T. L. 2023. Efecto de la aplicación edáfica de Silicio y Magnesio en el desarrollo del cultivo de col morada “*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra” en el cantón Tulcán. UPEC. Disponible en <http://repositorio.upec.edu.ec/handle/123456789/2134>
- Tejera-Hernández, B., Rojas-Badía, M. M., Heydrich-Pérez, M. 2021. Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control biológico de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 42(3), 131-138. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1812/181222321004.pdf>
- Ube, S. 2020. *Importancia del Magnesio como macroelemento para el desarrollo y rendimiento del cultivo de arroz (Oryza sativa L.)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO; UTB, 2019). Disponible en

<http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/7273>

Velasco, J. 2024. *Medidas preventivas para evitar la pudrición de la vaina (Sarocladium Oryzae) en el cultivo de arroz (Oryza Sativa L.)* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). Disponible en <http://190.15.129.146/bitstream/handle/49000/16010/E-UTB-FACIAG-%20AGROP-000091.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Villavicencio Miranda, B. H. 2023. *Los macronutrientes y su importancia en el cultivo de algodón (Gossypium hirsutum L.) en Ecuador* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2023). Disponible en <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/14028>

Zambrano Roble, J. L. 2022. *Efectos de dos planes de fertilización foliar con Mg, S, Y Zn en la productividad de Musa AAB* (Doctoral dissertation). Disponible en <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5232>

Zambrano, A. 2020. Análisis físico y químico de los suelos agrícolas del Sur de Manabí y su relación con los cultivos. Jipijapa. UNESUM. Facultad de Ciencias Naturales y de la Agricultura. 73pg. Disponible en <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2929>

#### 4.2. Anexos



Figura 1. Síntomas de deficiencia de magnesio en arroz.



Figura 2. Incorporación de rastrojos de la cosecha anterior para incrementar magnesio en la siembra de arroz.