

NANOPARTÍCULAS DE MAGNESIO Y ÓXIDO DE MAGNESIO COMO NANOFERTILIZANTES Y ANTIMICROBIALES

Ricardo Hugo Lira-Saldivar

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Saltillo, Coah., México

Fernando Ramírez-Luna

Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), Departamento de Biociencias y Agrotecnología. Saltillo, Coah., México

Eduardo Aron Flores-Hernández

Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Torreón, Coah., México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: El magnesio (Mg) participa en la formación de la clorofila y es un elemento esencial para la estructura normal del cloroplasto. Su proporción representa alrededor del 2.7% del peso molecular de la clorofila. Algunos estudios sugieren que la falta de contenido de clorofila y de Mg en las hojas no se debe a la falta de Mg para la síntesis de las moléculas de clorofila, sino a la dificultad para realizar la síntesis de proteínas. En los últimos años, resultados de investigación sugieren que el daño de las especies reactivas de oxígeno (ROS) producidas bajo estrés por falta de Mg, es la razón principal por la disminución del contenido de clorofila y la pérdida del verdor y el amarillamiento de las hojas. Los iones de Mg en concentraciones bajas pueden reducir la formación de las pilas de tilacoides en la grana, afectando eso la captura de energía proveniente de la radiación solar. Al mismo tiempo, el Mg puede regular la distribución de la energía de excitación entre el cloroplasto desde el fotosistema PSII y PSI, aumentando la producción de fluorescencia relativa del PSII al PSI, para que las plantas puedan convertir más energía luminosa en energía química. Además, el Mg puede mantener cierta conformación de los centros de reacción en las clorofilas antena y de algunos transportadores de electrones a nivel molecular, para así mantener un estrecho contacto para asegurar una absorción, transferencia y conversión de la energía lumínica en carbohidratos.

INTRODUCCIÓN

El magnesio (Mg) se podría llamar el elemento olvidado en la producción de cultivos, ya que su suministro y su necesidad suelen subestimarse. El Mg es un nutriente esencial para una amplia gama de procesos fisiológicos y bioquímicos fundamentales en las plantas, donde las membranas permiten su transporte hacia el citoplasma (Li et al.,

2023). Este nutriente es esencial para la síntesis de clorofila, la producción, transporte y utilización de fotoasimilados, así como la activación de enzimas y la síntesis de proteínas (Ishfaq et al., 2022). La deficiencia de Mg inhibe la absorción del nitrato, pero la aplicación de este mineral promueve la síntesis de sorbitol en las hojas y su transporte a las raíces del manzano (Tian et al., 2023).

El problema del exceso de N y la deficiencia de Mg en los cultivos agrícolas se está volviendo más común, grave y generalizado. Se sabe que el Mg es un nutriente esencial para las plantas; sin embargo, las respuestas fisiológicas de los cultivos de campo a la deficiencia de Mg, particularmente en su interacción con N, siguen siendo bastante desconocidas. Deng et al. (2023) señalan que la deficiencia de Mg, provoca una reducción en las actividades de las enzimas antioxidantes, pero el suministro de NO_3 mejoró la fotosíntesis neta, transpiración, la conductancia

Los transportadores de cationes como Mg están involucrados en muchos procesos fisiológicos como la señalización e integridad celular, la osmorregulación, la absorción de nutrientes, la tolerancia al estrés, la homeostasis iónica y la fotosíntesis. Acorde con Sharma et al. (2022) las plantas requieren un sistema bien desarrollado para mantener el equilibrio iónico, ya que la escasez y acumulación de excedentes de Mg pueden causar problemas graves en el crecimiento y desarrollo normal de las plantas. El Mg se ha convertido globalmente en un nutriente limitante para la producción óptima de cultivos, siendo esta deficiencia mineral un problema generalizado que afecta la productividad y la calidad en los sistemas agrícolas y forestales (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019).

El suministro de Mg también puede aumentar la actividad del sistema de enzimas antioxidantes y disminuye el estrés oxidativo en células vegetales (Ahmed et al., 2021).

Acorde con Boaretto et al. (2020) un nivel óptimo de Mg aumenta la tolerancia de las plantas al estrés ambiental, lo que permite el mantenimiento de altas tasas fotosintéticas y de transpiración. Como resultado de la introducción de cultivos sensibles a fertilizantes de alto rendimiento, el Mg se ha convertido en un nutriente limitante para la producción óptima de los cultivos. Además, se ha demostrado que ayuda a fortalecer el sistema inmune de las plantas.

Aparte de las plantas, el Mg es un elemento clave para la salud animal y humana. El uso del Mg también está involucrado con la supresión y rehabilitación de varias enfermedades humanas relacionadas con la hipertensión, como problemas cerebrovasculares, enfermedades cardiovasculares y diabetes (Alawi et al., 2018). Es por esos efectos benéficos del Mg en la fisiología y productividad de las plantas cultivadas, que el presente trabajo se enfocó a revisar literatura actualizada que señale el estado del arte, con respecto a los beneficios que científicamente se han comprobado y que están relacionadas con el uso de fertilizantes, nanofertilizantes y nanomicrobiales basados en magnesio.

IMPORTANCIA DEL MAGNESIO EN LA FISIOLOGÍA DE PLANTAS CULTIVADAS

El Mg es uno de los cationes más abundantes en las células vegetales, las que normalmente requieren de 1.5 a 3.5 g kg⁻¹ para lograr un óptimo crecimiento de las plantas. Este mineral ejerce interacciones sinérgicas y antagónicas entre el K y Mg en las plantas (Xie et al., 2021), además, es el elemento central de la molécula de clorofila, siendo un activador de más de 300 enzimas (Chen et al., 2018). Los iones de Mg en concentraciones bajas pueden inducir la formación de pilas de tilacoides en la grana de los cloroplastos, permitiendo capturar la energía en los fotosistemas (FS) I y

II, para luego hacer su transferencia energética a los centros de reacción lumínica (Tamura et al., 2020).

De igual manera el Mg puede regular la distribución de la excitación energética entre el FSII y FSI y aumentar la relación de producción de fluorescencia del FSII al FSI, para que las plantas puedan convertir más energía lumínica en energía química (Yan y Hou, 2018). Queda claro que el Mg es vital para muchas funciones fisiológicas y procesos bioquímicos de las plantas, incluyendo la fotosíntesis, la energía metabólica, la síntesis de proteínas y la partición y distribución de carbohidratos (Figura 1), además en procesos fisiológicos que afectan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (de Bang et al., 2021).

Se han realizado experimentos para mitigar los diferentes impactos ambientales relacionados con las actividades agrícolas. El empleo de polvo de roca es un importante mecanismo de remineralización del suelo para la agricultura tropical sostenible. Considerando eso, Crusciol et al. (2019) evaluó el efecto fisiológico causado por dosis de dunita en la concentración de Mg, silicio (Si), azúcares reductores, sacarosa y almidón foliar en maíz (*Zea mays* L.). Tanto en los cultivos, como en los suelos, el contenido de Mg, Si, azúcares reductores, pH, Mg y Si del suelo y los componentes de productividad, reportaron una respuesta fisiológica positiva que fue asociada con el incremento de las dosis aplicadas. Sin embargo, la dosis más alta de Mg resultó en niveles más bajos de sacarosa y almidón foliar.

Una de las primeras respuestas fisiológicas de las plantas a la deficiencia de Mg es una partición alterada de los fotoasimilados entre los órganos que son la fuente (hojas) y aquellos que son la demanda (yemas, flores, frutos, raíces, etc.), lo que resulta en la acumulación de carbohidratos en hojas e inhibición del

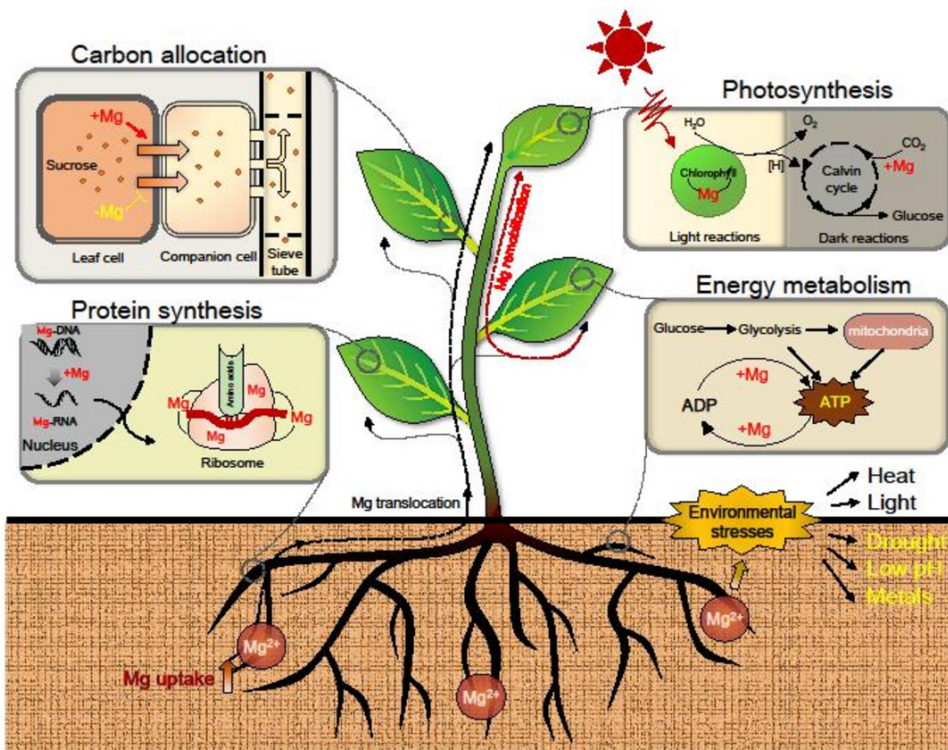


Figura 1. Los efectos del magnesio en las plantas son muchas y muy variadas, pero destacan su importancia en la fotosíntesis, la energía metabólica, la síntesis de proteínas y en la partición y distribución de fotosintatos (Tomado de: Chen et al., 2017).



Figura 2. Deficiencia de magnesio en hojas de *Vitis vinífera* mostrando una clorosis intervenal, pero las venas se mantienen verdes. Siempre que hay una deficiencia de Mg, los cloroplastos pueden dañarse. En las hojas más viejas, no se nota una deficiencia de Mg fácilmente, ya que nota primero en las hojas más jóvenes.

crecimiento de los órganos demandantes como son las raíces, flores y semillas. Los síntomas de deficiencia de Mg (Figura 2) aparecen como una clorosis intervenal en las hojas, junto con el desarrollo de lesiones cloróticas y necróticas en etapas posteriores, particularmente bajo alta intensidad de luz (Guo et al., 2016).

Con base en la compleja competencia entre el Mg y otros cationes del suelo, una alta concentración de Mg en la solución del suelo no significa necesariamente que esté disponible para las plantas. Los suelos ácidos pueden estar muy saturados con cationes como H^+ , Al^{3+} y Mn^{2+} , que inducen la deficiencia de Mg en las plantas al interferir con la absorción de Mg por la raíz (Kunhikrishnan et al., 2016). La adición de altas cantidades de Mg reduce la inhibición del crecimiento y desarrollo de las plantas por el efecto de metales tóxicos pesados como el cobre y el cadmio; sin embargo, un efecto antagónico también ha sido descrito entre el hierro y el Mg (Hermans et al., 2011).

Analizando la interacción antagónica entre el Mg y el K en las plantas de tomate, Yan et al. (2020) reportan que, con el aumento en la aplicación de fertilizante de Mg, el contenido de K intercambiable del suelo disminuyó significativamente, mientras que el Ca/K aumentó. El contenido de K intercambiable del suelo con 90 kg/ha de $MgSO_4$ y 234 kg/ha de K_2O aplicados, fueron los más bajos entre todos los tratamientos.

Los rendimientos de los tomates y la absorción de Ca y Mg aumentaron a medida que aumentaba el suministro de Mg. Se concluye que reducir la aplicación de K fue una forma mucho más eficiente de disminuir el K/Mg del suelo y restaurar el desequilibrio catiónico que proporciona el fertilizante de Mg en suelos calcáreos. En el reporte de Koch et al., (2019) se consigna que los suministros bajos de K o Mg en plantas de papa dieron

como resultado un aumento en los niveles de transcripción de simportadores H^+ /sacarosa, pero el aumento fue menos pronunciado durante la deficiencia de Mg.

La aplicación de cal (CaO) o materiales calcáreos a suelos ácidos, es una práctica agrícola cuando se quiere corregir el pH; sin embargo, en el caso de las calizas calcíticas, esta actividad agronómica puede alterar la disponibilidad del K y Mg para las plantas debido a varios procesos químicos que ocurren después del encalado, como es el aumento de la adsorción del suelo y la reducción de la absorción por las raíces debido a la competencia con el Ca^{2+} . La aplicación de fertilizantes como K^+ y NH_4^+ en los sistemas de cultivo, pueden aumentar el riesgo de deficiencia de Mg, debido a la interferencia antagonista con la absorción de Mg por la planta (Holland et al., 2018).

Debido a su poca adsorción a los coloides del suelo, el Mg es altamente propenso a la lixiviación durante el riego o lluvia. La remoción anual de Mg por la biomasa cosechada, puede alcanzar hasta 100 kg ha⁻¹ mientras que las pérdidas por lixiviación pueden ser hasta de 90 kg ha⁻¹, como se ha reportado en un suelo cultivado con caña de azúcar en Brasil (Oliveira et al., 2000). Una severa deficiencia de Mg también podría estar asociada con una fertilización desequilibrada a largo plazo, lo que conduce a un grave agotamiento del Mg en el suelo.

La deficiencia de Mg en las plantas puede ser ocasionada porque haya muy bajas cantidades disponibles en los suelos, debido a la pérdida de este nutriente por lixiviación, especialmente en suelos ácidos y arenosos (Mikkelsen, 2010). Cuando se presenta una deficiencia de Mg la productividad de las plantas se ve muy afectada por diversas razones fisiológicas como: (a) su capacidad para fijar el carbono atmosférico en carbono orgánico mediante la fotosíntesis: (b) translocar el carbono

asimilado en las hojas a los sitios de demanda y (c) por utilizar el carbono asimilado en los tejidos demandantes de fotoasimilados para el crecimiento y el desarrollo (Marschner, 2012).

RELACIÓN DEL MAGNESIO CON LA FOTOSÍNTESIS

Debido a las varias funciones clave del Mg, especialmente en la fotosíntesis, la partición de fotoasimilados, la síntesis de proteínas y la regulación de enzimas, la deficiencia de Mg puede conducir a un crecimiento y rendimiento deficiente de los cultivos agrícolas (Guo et al., 2016). El Mg tiene una acción muy importante en la partición de los fotoasimilados en las plantas y, además, alivia el daño fotooxidativo en los cultivos de las zonas de alta radiación solar (Cakmak y Kirkby, 2008). En la Figura 3 se ilustra la molécula de clorofila y la ubicación del Mg en su interior.

El potasio (K) y el Mg son nutrientes minerales que las plantas requieren en grandes cantidades. Ambos elementos contribuyen críticamente al proceso de fotosíntesis y al posterior transporte de los fotoasimilados a larga distancia. Si el K o Mg no están presentes en cantidades suficientes en los tejidos fotosintéticos, las complejas interacciones de las respuestas anatómicas, fisiológicas y bioquímicas dan como resultado una reducción de la asimilación del carbono fotosintético (Tränkner et al., 2018). Bajo esta limitación fotosintética, la energía luminosa absorbida es superior a la que se puede utilizar en los procesos de fotosíntesis, lo que conduce a una mayor producción de ROS y las plantas sufren estrés oxidativo (Figura 4).

Como consecuencia, la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno provoca la fotooxidación del aparato fotosintético y provoca una regulación positiva de los mecanismos fotoprotectores.

Estructuralmente, el Mg es un componente

de la lámina media celular y un constituyente de la molécula de clorofila, razón por la cual es muy importante para la fotosíntesis (Bücking et al., 2002). Este mineral se requiere para la preservación de la estructura e integridad celular y de organelos como los ribosomas; también está asociado con un crecimiento rápido, mitosis activa, altos niveles de proteínas, metabolismo de carbohidratos y fosforilación oxidativa. Además, acorde con Marschner (2011), está implicado en las reacciones de transferencia de energía, la respiración, la formación de ADN y ARN, y sirve como cofactor para muchas enzimas.

El Mg por su posición central en la molécula de clorofila facilita una organización bien estructurada de las granas y las laminillas en el estroma del cloroplasto. En consecuencia, la deficiencia de Mg ejerce efectos adversos sobre el estructura y función de los cloroplastos y la actividad de la enzima Rubisco, como sucede en la caña de azúcar (García et al., 2022).

También afecta la capacidad de las reacciones lumínicas en el estroma, y la partición de carbono y fotoasimilados entre los órganos demandantes y, por lo tanto, en la asimilación de carbono durante la fotosíntesis (Tränkner et al., 2018). Aunque el K y el Mg difieren en sus funciones fisiológicas asociadas con la fotosíntesis, su interacción puede tener efectos sinérgicos en la regulación de la capacidad de la maquinaria fotosintética, que necesita un aporte equilibrado entre el K y el Mg (Li et al., 2018).

La deficiencia de Mg puede afectar todo el transporte de electrones fotosintéticos, incluyendo el daño estructural a los tilacoides, la desintegración del fotosistema II, la inactivación del complejo generador de oxígeno y los centros de reacción, provocando eso una mayor reducción del aceptor primario de electrones de la quinona, lo que reduce la transferencia de energía y la eficiencia de absorción y transferencia de electrones al sitio

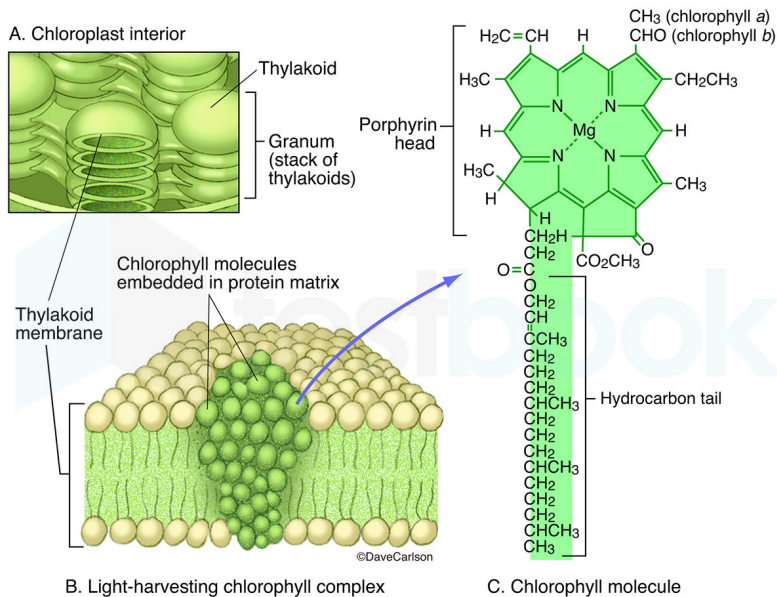


Figura 3. Estructuralmente, el magnesio es un componente central de la cabeza de porfirina en la molécula de clorofila, razón por la cual este mineral adquiere una gran importancia en todo el proceso de fotosíntesis (Tomado de: <https://www.quora.com/Where-do-plant-cells-get-their-chlorophyll>).

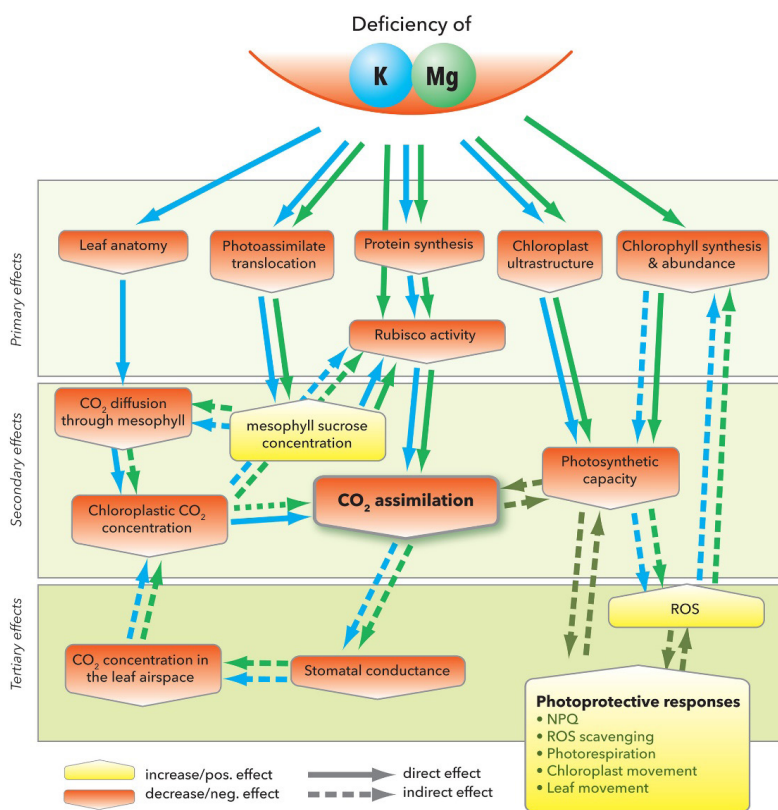


Figura 4. Efectos de las deficiencias de potasio y magnesio en los procesos relacionados con la fotosíntesis, translocación de fotoasimilados y fotoprotección. Los efectos primarios son respuestas anatómicas, fisiológicas o bioquímicas directas debido a la deficiencia de K y/o Mg. Los efectos secundarios siguen a los efectos primarios y eventualmente inhiben la asimilación fotosintética del CO₂ (Tomado de: Tränkner et al., 2018).

de las reacciones no lumínicas (Ye et al., 2019).

Bajo esas condiciones la tasa de asimilación de CO_2 se reduce significativamente en las hojas. Además, la clorosis intervenal por la deficiencia de Mg provoca el agrandamiento de las venas, alteraciones fotosintéticas y los parámetros que están relacionados aumentan acorde con la mayor edad de las hojas in sugar beet plants (Hermans et al., 2004).

Una deficiencia de K o Mg resulta en una disminución sustancial de la fotosíntesis (Farhat et al., 2016). Debido a las diferentes formas y función de esos dos elementos en las plantas, sus efectos sobre la tasa fotosintética pueden variar por diferentes razones. La fotosíntesis está mediada por la coordinación entre el K y el N. El potasio como osmolito dominante se acumula en las hojas, principalmente en las células guarda, regulando la morfología y función de los estomas, afectando así la conductancia estomática que está definida por la concentración de CO_2 interno y la capacidad de carboxilación (Xie et al., 2020).

El K y el Mg tienen acciones muy relevantes en muchos procesos fisiológicos de las plantas (Figura 5) como los siguientes: 1) La deficiencia de K altera la anatomía de la hoja y, por lo tanto, la difusión de CO_2 en el mesófilo. 2) Tanto las deficiencias de K como de Mg alteran la ultraestructura de los cloroplastos. 3) El Mg es el átomo central del pigmento de clorofila y también se requiere para su biosíntesis. 4) Tanto el K como el Mg reducen la cantidad y la actividad de Rubisco y el Mg también funciona en la activación de Rubisco. 5) El K y Mg son necesarios para la translocación desde la fuente de producción hasta el órgano o tejido receptor de fotoasimilados, ya que tienen funciones importantes en la carga apoplástica de sacarosa en el floema (Tränkner et al., 2018).

Al estudiar en China los cultivares de trigo Zhoumai 27 y Aikang 58, los resultados obtenidos por Ba et al. (2020) indican que, a lo

largo de las diferentes etapas de crecimiento, las hojas bandera de las plantas de trigo exhibieron una alta tasa fotosintética, mayor conductancia estomática y transpiración, así como una disminución en la concentración de CO_2 intercelular.

Debido a eso, la aplicación foliar de sulfato de Mg durante el inicio de ciclo mantuvo una alta fotosíntesis después de la antesis o floración. Simultáneamente, el sulfato de Mg mejoró las actividades de las enzimas sacarosa sintasa e invertasa en los granos de trigo, también reforzó las actividades de la mayoría de las enzimas de síntesis de almidón, y en consecuencia eso condujo a un mayor contenido de almidón en los granos.

El Mg al igual que otros minerales están estrechamente relacionado con el incremento en el rendimiento y la calidad del tubérculo, además, promueven el verdor de las hojas y la salud del área foliar (Figura 6). Se han realizado muy pocos trabajos de investigación sobre la capacidad fotosintética de los bosques maduros con alto contenido de Ca y Mg. Por esa razón, Wang et al. (2018) midieron la fotosíntesis, así como el contenido de nutrientes de las hojas (N, P, Ca, Mg, K, y Na), masa foliar por área (LMA) y espesor foliar (LT) en China.

El estudio realizado por Koch et al. (2019), tuvo como objetivo determinar si las deficiencias de K o Mg afectan la producción y el transporte de fotoasimilados y, en consecuencia, el desarrollo de los tubérculos, que son los principales órganos demandantes de reservas. Las plantas de papa (*Solanum tuberosum*) se cultivaron en macetas usando arena con varios suministros de K y Mg. Tanto las deficiencias de K como de Mg redujeron la fotosíntesis, la asimilación neta de CO_2 y la producción de biomasa, además, la cantidad de azúcar y almidón de los tubérculos disminuyó durante las etapas con deficiencias de K y Mg.

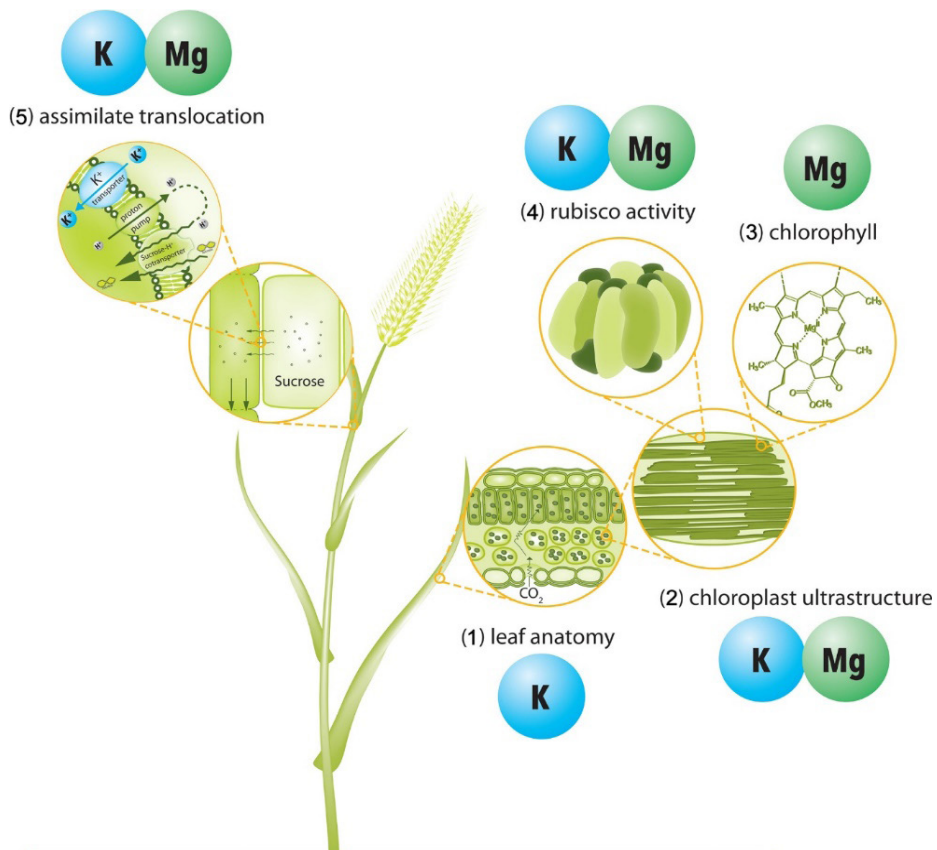


Figura 5. Localización de respuestas anatómicas, fisiológicas y bioquímicas en las plantas por la deficiencia de potasio y magnesio, las caules están relacionadas con la fotosíntesis y translocación de fotoasimilados (Tomado de: Tränkner et al., 2018).

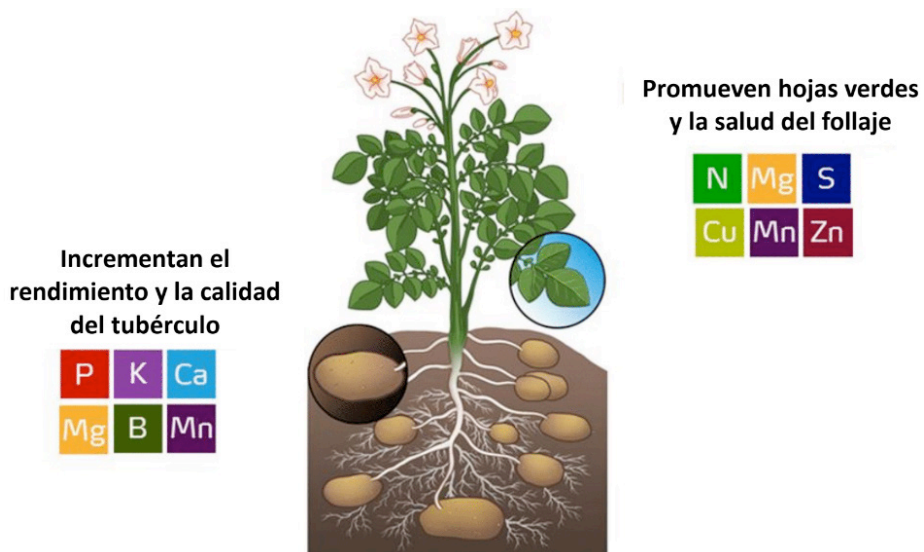


Figura 6. El Mg al igual que otros minerales metálicos presentes en el suelo y/o aplicados al follaje del cultivo de papa, están muy relacionados con el incremento en el rendimiento y la calidad del tubérculo, además, promueven la clorofila de las hojas y la salud del área foliar (Tomado de: <https://www.yaracanada.ca/crop-nutrition/potato/>).

Las plantas mostraron una fotosíntesis más alta cuando algunos factores estaban co-regulados por el N, P, Mg y LT. Las proporciones de V_{max} a N o P, y J_{max} a N o P, se correlacionaron significativamente de forma positiva con el Mg. Los autores especulan que la capacidad fotosintética de los árboles puede ser modificada por el Mg, ya que este mineral puede mejorar la eficiencia en el uso del N y P.

Rodrigues et al. (2021) realizaron un trabajo para analizar el efecto de la fertilización foliar suplementaria con Mg en los cultivos de soya y maíz. Evaluaron la suplementación foliar de Mg en soya seguida de maíz; habiendo determinado la fotosíntesis, la actividad PEPasa y Rubisco, la concentración de azúcares en hojas, el estrés oxidativo, el metabolismo antioxidante y el rendimiento.

Se encontró que la aplicación foliar de Mg aumentó la tasa fotosintética y la conductancia estomática. El incremento en la fotosíntesis y actividad de Rubisco, permitió un aumento en la concentración de azúcar. Se concluye que la fertilización foliar con Mg como una estrategia para aumentar el metabolismo de los cultivos, resulta en un aumento en los rendimientos de grano, por lo que esa estrategia se podría promover para su utilización en los cultivos de gramíneas y leguminosas.

Li et al. (2020) reportan que las fluctuaciones diarias de Mg en los cloroplastos del arroz (*Oryza sativa*), pueden funcionar como un regulador de la asimilación fotosintética del CO_2 en el cultivo. Esos autores descubrieron que un gen (*OsMGT3*) transportador de Mg localizado en los cloroplastos y que se expresa rítmicamente en las células del mesófilo de las hojas, modula en parte las fluctuaciones de Mg en los cloroplastos del arroz.

En parte debido al calentamiento global, las crecientes olas de calor han afectado las condiciones ambientales requeridas para el crecimiento óptimo de los cultivos y han

reducido el rendimiento y la calidad de las cosechas en todo el mundo. Para analizar el efecto del cambio climático en la fenología de cultivos cerealeros Fatima et al. (2020) realizaron un estudio tratando de entender las condiciones de adaptación de los cereales al incremento excesivo de la radiación y la temperatura del aire.

Por otra parte, el estudio de Boaretto et al. (2020) se orientó a clarificar la posible acción de una extra aplicación de Mg y N para paliar o aliviar el estrés causado por excesiva radiación y temperatura en árboles de limón. Los limoneros se cultivaron en un invernadero con suministro adicional de Mg, N y Mg + N, durante cinco meses y luego se expusieron al calor durante 12 días. El suministro adicional de nutrientes aumentó la tolerancia de las plantas al estrés ambiental, lo que permitió mantener altas tasas fotosintéticas y de transpiración, así como una disminución en el transporte de electrones; además, se incrementó la actividad del sistema de enzimas antioxidantes y disminuyó el estrés oxidativo.

El arroz (*O. sativa* L.) es uno de los cultivos alimentarios más importantes de China y se considera que es la fuente principal de exposición humana a la contaminación por cadmio (Cd). En el experimento realizado por Li et al. (2022) al agregar Ca y Mg a las soluciones de nutrientes para plantas de arroz redujo la acumulación de Cd en el arroz, pero bajo las mismas condiciones, no está claro cuál tiene el mejor efecto. Por lo tanto, se realizaron experimentos hidropónicos para comparar los efectos de Ca y Mg con concentraciones de (0,10, 0.25 y 0.50 g/L, respectivamente) sobre la absorción, distribución y translocación de Cd en el arroz.

En las plantas de arroz, la vía principal de acumulación de Cd en los granos es la absorción por las raíces (Figura 7). Por lo tanto, reducir la acumulación y translocación de Cd en el arroz es una prioridad para la

seguridad alimentaria y la salud humana. Se determinaron los contenidos de Cd en raíces, tallos, hojas, panículas, cáscaras y granos en diferentes estados de crecimiento. Los resultados revelaron que la suplementación de Ca y Mg influyó en la acumulación y translocación de Cd en los tejidos del arroz. Las concentraciones de Cd de los diferentes patrones estuvieron en el siguiente orden: raíces > tallos > hojas \approx panículas \approx cáscaras > granos.

La fotosíntesis proporciona alimentos, fibras y combustibles que sustentan a nuestra sociedad; comprender los mecanismos que controlan los cambios dinámicos en este proceso ayuda a identificar nuevas opciones para mejorar la fotosíntesis. La fotosíntesis muestra cambios diarios, que se atribuyen a las condiciones externas de luz/oscuridad, así como a la expresión génica interna y la modificación postraduccional de enzimas críticas.

En el estudio de Li et al. (2020) se informó sobre las fluctuaciones diarias (Figura 8) de Mg en los cloroplastos del arroz, que pueden funcionar como un regulador del ritmo que contribuye a la regulación postraduccional de la asimilación fotosintética de CO₂ en el arroz. Por eso mejorar la entrada de Mg a los cloroplastos podría ser una línea de investigación para optimizar la eficiencia fotosintética en las plantas.

Debido a que OsMGT3 exhibe un patrón oscilatorio diario en la expresión génica, controla la fluctuación diaria de los niveles de Mg en el cloroplasto. Durante el día, cuando la OsMGT3 es abundante, los niveles de Mg en el cloroplasto son altos, lo que lleva a una fuerte actividad de la enzima Rubisco; por el contrario, en la noche, un nivel bajo de OsMGT3 da como resultado concentraciones limitadas de Mg y baja actividad de Rubisco en el cloroplasto. Este patrón de cambios diarios en el estroma del cloroplasto explica la

oscilación circadiana de la fijación de CO₂ y, por lo tanto, contribuye en parte a los ritmos circadianos de la fotosíntesis que influye en el crecimiento y el rendimiento del arroz.

El estrés por alta salinidad (HS) es un efecto global que restringe la productividad agrícola. El arroz es un cultivo muy importante, pero la salinidad del suelo tiene un impacto perjudicial en su rendimiento y calidad del grano. Las nanopartículas (NPs) se han encontrado como un recurso de mitigación contra diferentes estreses abióticos, incluso el estrés por HS.

En este estudio de Song et al. (2023), la nanotecnología mediante el uso de NPs de óxido de magnesio y quitosan (NPsCMgO) se utilizaron como una nueva técnica para aliviar el estrés salino en las plantas de arroz (Figura 9). Los resultados mostraron que 100 mg/L de NPsCMgO aliviaron el estrés salino al mejorar la longitud de la raíz en 37.47%, incrementar la biomasa seca en 32.86%, la altura de la planta en 35.20% y la biosíntesis de tetrapirrol en plántulas de arroz hidropónicas.

La aplicación de 100 mg/L de NPsCMgO alivió el estrés oxidativo generado por la salinidad con actividades inducidas por enzimas antioxidantes: catalasa en 67.21%, peroxidasa en 88.01% y superóxido dismutasa en 81.19%, además disminuyó los contenidos de malondialdehído en 47.36% y H₂O₂ en 39.07% en hojas de arroz. Los autores concluyen que los árboles de cítricos en condiciones de estrés por temperatura y radiación elevadas, asociadas a olas de calor, tienen menos daño en el aparato fotosintético y en el sistema enzimático antioxidante cuando se les suministra un nutriente adicional de N y/o Mg.

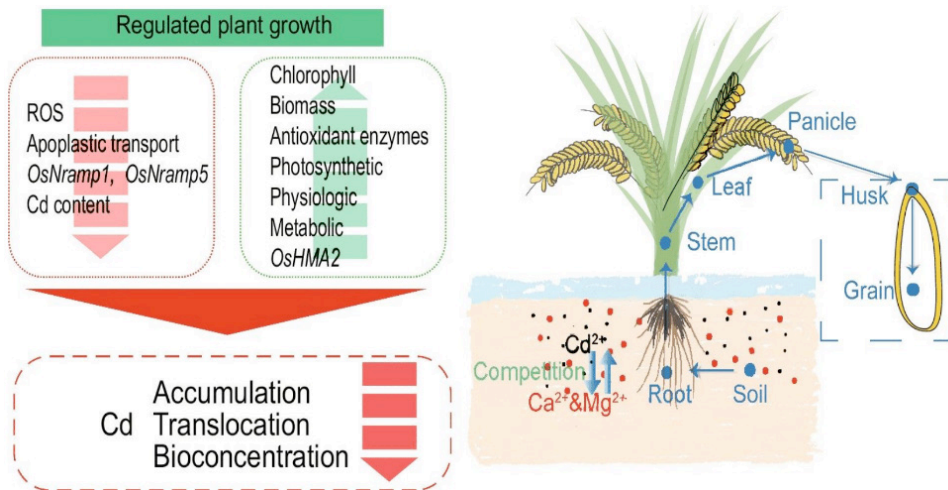


Figura 7. La aplicación de calcio y magnesio ayuda a liberar la fitotoxicidad por cadmio en plantas de arroz. La translocación de Cd ocurre desde el suelo hacia las raíces, tallo, hojas, panículas o espigas y granos (Tomado de: Li et al., 2022).

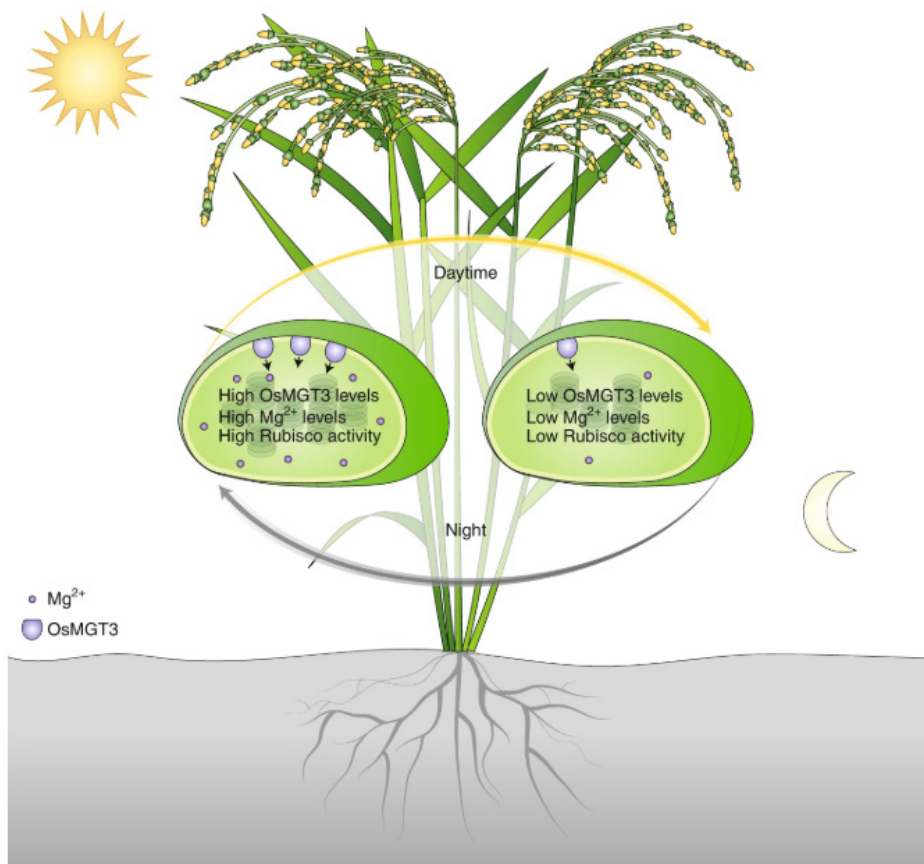


Figura 8. El gene transportador OsMGT3 media el transporte de Mg en el cloroplasto del arroz y contribuye diariamente a la asimilación de carbono fotosintético. El gen OsMGT3 es un transportador de Mg localizado en la envoltura del cloroplasto de las células del mesófilo de arroz y facilita mediante la enzima RuBP la carga de este mineral en el citoplasma y dentro del estroma en los cloroplastos (Tomado de: Tang y Luan, 2020).

MAGNESIO COMO INDUCTOR DE LA SEÑALIZACIÓN EN PLANTAS

El Mg es uno de los cationes más abundantes en las células vivas, solo superado por el potasio (Shaul, 2002). Se requiere una reserva sustancial de Mg celular para sintetizar clorofila en los tejidos fotosintéticos, y el resto se utiliza para el puente entre los ribosomas durante la traducción y para la quelación con nucleótidos, ácidos nucleicos y otros compuestos que contienen fosfato.

Por lo general siempre hay un límite crítico que pueden soportar las plantas antes de sentirse los efectos negativos por la falta de Mg en el crecimiento vegetativo, así como en su sistema de señalización basado en la defensa foto-oxidativa (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019). Normalmente, hasta el 20% del Mg total se encuentra en los cloroplastos, pero puede aumentar hasta 50% en condiciones de poca luz o durante la deficiencia de Mg (Cakmak et al., 1994). Muchas enzimas requieren del Mg para su actividad y/o regulación (Farhat et al., 2016).

Procesos como la carga de fotosintatos al floema, la senescencia de las hojas, la apertura estomática y el equilibrio iónico de la célula, son solo algunos de los muchos ejemplos que ilustran el requisito de una señalización y homeostasis adecuada del Mg (Gransee y Fühns, 2013). En la Figura 10 se muestran sus funciones en el crecimiento y desarrollo fisiológico y morfológico en las plantas.

La quelación de nucleótidos por Mg es una característica esencial del metabolismo celular. Entre los nucleótidos, ATP y ADP son los más abundantes, produciéndose ATP durante la fosforilación reductiva (reacciones fotosintéticas de la luz), como en la oxidativa durante la respiración (Senbayram et al., 2015).

En algunos compartimentos como el citosol y en condiciones fisiológicas

específicas, el Mg puede disminuir en los cloroplastos muy por debajo de 1 mM, durante la fase de inducción de la fotosíntesis (Xie et al., 2021). Los nutrientes minerales como N, Mg, Cu, Mn, Zn, etc. son parte integral de varias enzimas (Cu/Zn-SOD, Mn-SOD, etc.) y antioxidantes que participan en el metabolismo energético o eliminan la señalización y generación de especies ROS.

La deficiencia de Mg en las plantas es un problema generalizado que afecta la productividad y calidad en los sistemas agrícolas y forestales. Los datos publicados se han enfocado a la relación entre la nutrición de Mg y los parámetros relacionados con la señalización y el crecimiento de las plantas, como la biomasa de raíces y tallos, el rendimiento, la asimilación neta de CO₂ y las actividades enzimáticas antioxidantes.

Muchos estudios indican que un suministro adecuado de Mg mejora la asimilación neta de CO₂ en 140%, lo que implica aumentar la biomasa en 61% en comparación con las plantas deficientes de Mg (Hauer-Jákli y Tränkner, 2019). La partición de biomasa entre tallo y raíz no solo es sensible a la nutrición con Mg, sino que también se ve muy afectada por la técnica experimental empleada.

Si las plantas se cultivan con un suministro adecuado de Mg durante las etapas iniciales de crecimiento antes de exponerlos a la deficiencia de Mg, la relación tallo-raíz no se ve afectada (He et al., 2020). Por el contrario, esta relación tallo-raíz disminuye significativamente en comparación con las plantas deficientes de Mg.

De manera análoga que el K, el Mg sirve como catión en procesos fisiológicos similares, por ejemplo, en la señalización para la regulación del equilibrio catión-anión y como ion osmóticamente activo en la regulación de la turgencia de las células (Marschner, 2012). Además, el Mg contribuye al igual que el K,

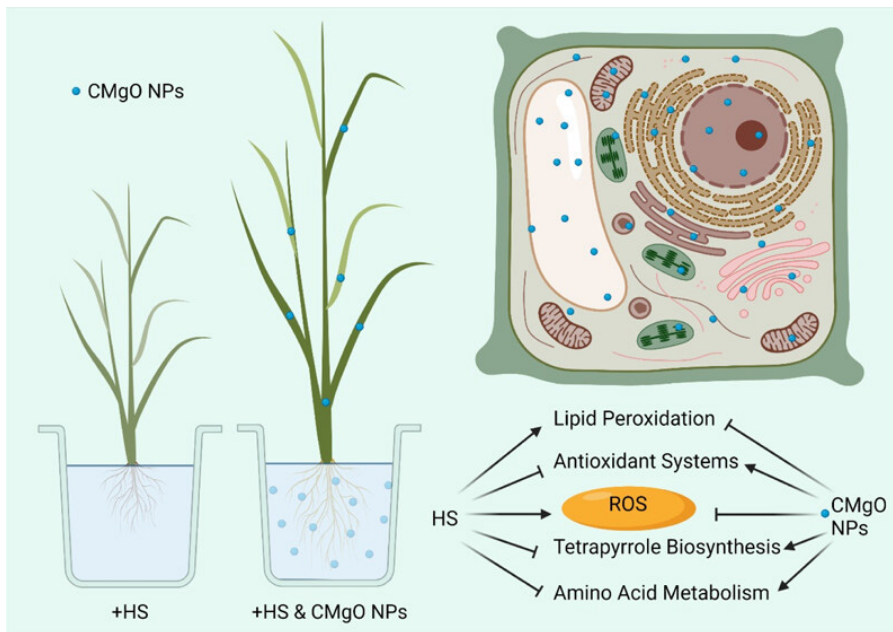


Figura 9. Esquema que ilustra la acción del suplemento con nanopartículas de óxido de magnesio y quitosán, para mejorar el contenido de aminoácidos libres bajo estrés salino en las hojas de arroz. Esto muestran que la suplementación con NPs CMgO potencialmente podría mitigar el estrés salino en plántulas de arroz (Tomado de: Song et al., 2023).

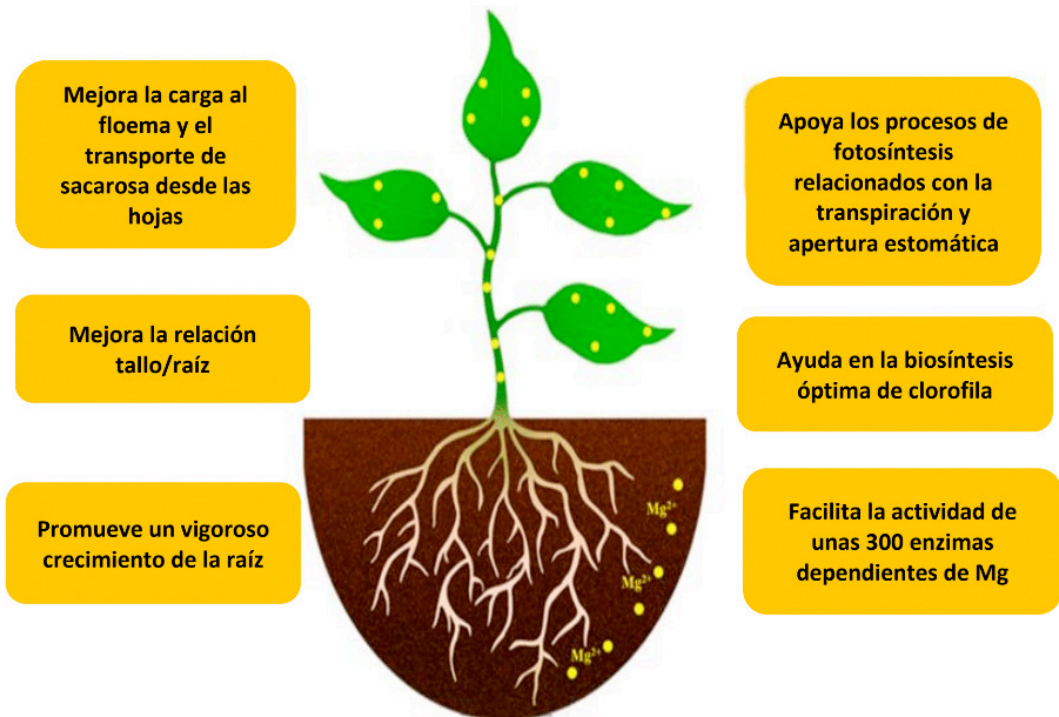


Figura 10. El Mg es uno de los nueve macronutrientes esenciales que las plantas utilizan en gran cantidad para su crecimiento y reproducción. En este esquema se ilustran las funciones positivas de este mineral en el crecimiento, así como el desarrollo fisiológico y morfológico de las plantas (Adaptado de: Chaudhry et al., 2022).

a mantener un pH estable para la actividad adecuada de enzimas fotosintéticas como la RuBP en plantas de espinaca en condiciones deficientes de Mg (Yuguan et al. 2009).

El Mg se une específicamente a la enzima RuBP y, por lo tanto, mejora su actividad catalítica. Además de la RuBP, el Mg es un activador de cientos de enzimas (Verbruggen y Hermans, 2013). Otra función esencial que comparte el Mg con el K se encuentra en la partición de carbohidratos sintetizados. Se requiere Mg para la carga del floema con sacarosa, ya que es un activador de las ATPasas, que crean un gradiente de protones que proporciona energía para el transporte de sacarosa y protones a través de simportadores de sacarosa/H⁺ (Hermans et al., 2004).

El Mg sirve al igual que el K en funciones cruciales para la fotosíntesis y la partición de fotoasimilados. Aunque Koch et al. (2019) no pudieron encontrar ninguna reducción en la tasa de asimilación neta de CO₂ en plantas de *S. tuberosum* con deficiencia de Mg, si reportaron acumulaciones significativas de azúcares en las hojas, lo que indica un proceso restringido de carga en el floema en plantas de papa. Las deficiencias de K y Mg causaron depósitos de azúcar en compartimentos celulares separados de las hojas fuente, lo que provocó un impacto en la expresión génica y señalización de los sistemas de transporte de sacarosa.

Otro estudio reportado por Koch et al. (2020) menciona que además de otras estrategias agronómicas, el suministro adecuado de nutrientes es de gran importancia para lograr el rendimiento deseado, pero para encontrar el nivel óptimo de suministro de nutrientes, es importante comprender las funciones fisiológicas individuales de cada nutriente. Acorde con Yan et al. (2020) también debe considerarse el antagonismo nutricional entre Mg y K, o los efectos específicos que proporcionan condiciones

ambientales bióticas y abióticas. Con base en este conocimiento fundamental, un productor de tomate en invernadero puede decidir la elección precisa del tipo, momento y cantidad de fertilizantes por aplicar.

RESPUESTAS DE PLANTAS CULTIVADAS A LA FERTILIZACIÓN CON MG

En un estudio realizado por Abdul-Sahib et al. (2023) para analizar el efecto del sustrato perlita, residuos de palma y magnesio en plantas de gerbera (*Gerbera jamesonii* L.), los resultados mostraron que la altura de las plantas se incrementó en 27.75 cm, el número de hijuelos en 3.05/planta y el área foliar en 136.3 cm². Además, hubo incrementos en N (1.96%), P (0.25%) y K (2.03%), clorofila (1.45 mg/g peso fresco), carbohidratos (13.27%) y proteína (12.28%). También el diámetro del pedúnculo floral se hizo más grueso al aumentar la concentración de Mg. Además, el Mg a razón de 100 mg L⁻¹ elevó la vida de florero a 11.08 días.

La producción de semilla de papa mediante minitubérculos o tubérculos normales, requiere un buen suministro de nutrientes, el Mg desempeña una función importante en una variedad de procesos metabólicos y reacciones bioquímicas en las plantas, como la formación de clorofila, por eso, el aporte adecuado de este nutriente es de fundamental importancia en la producción de semilla de papa (Refaie et al., 2020).

El Mg es muy importante en procesos metabólicos y reacciones bioquímicas en las plantas, como la formación de clorofila, por eso, el aporte adecuado de este nutriente es de fundamental importancia en el cultivo de la papa y la producción de tubérculos (Barroso et al., 2021). Estos investigadores instalaron dos experimentos (I y II) simultáneos en un invernadero. Las dosis que proporcionaron el mayor rendimiento de semilla de papa, en

unidades por planta, en los experimentos I y II fueron respectivamente 0.0 g dm^{-3} de MgSO_4 y 0.96 mmol L^{-1} Mg.

La deficiencia de Mg se está convirtiendo en un problema de abastecimiento de minerales en los sistemas intensivos de producción agrícola, debido a la gran eliminación del Mg en los suelos, así como a la nutrición desequilibrada con este nutriente. Wang et al. (2020) concluyen que la fertilización con Mg mejora el rendimiento de los cultivos al optimizar el rendimiento de granos o frutos, y debido a que se obtienen resultados fisiológicos favorables, lo que brinda un gran potencial para el manejo integrado de Mg para un mayor rendimiento y calidad de los cultivos.

En muchas regiones del mundo el rendimiento del tomate (*S. lycopersicum*) es bajo debido al uso incorrecto o nulo de Mg como un importante nutriente. Para comprobar eso, Quddus et al. (2022) determinaron la dosis óptima de Mg para mejorar el rendimiento y la calidad, así como para evaluar la absorción de nutrientes de esta solanácea. La aplicación de $12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Mg produjo la mayor cantidad de frutos por planta (41.1), los frutos más pesados (74.3 g) y el mayor rendimiento de frutos ($69.7 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). El contenido de vitamina C en la fruta fue mejor (39.6 mg/100 g) con la aplicación de $12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de Mg.

El mismo tratamiento tuvo el mayor contenido de β -caroteno ($26.1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), mejoró la firmeza de la fruta y tuvo mejor contenido de proteína (18.8%) en los tomates maduros. El mayor margen bruto (48.6%) y mejor relación costo-beneficio fue con $12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de este mineral. Esa dosis de Mg parece ser la más adecuada para mejorar la cantidad, calidad y economía en la producción de tomates bajo condiciones de invernadero.

En el estudio de Geng et al. (2021) se cultivaron plantas de colza o canola (*Brassica*

napus L.) en seis lugares con diversas condiciones de suelo y crecimiento a lo largo de la cuenca del río Yangtze, que es una de las áreas productoras de colza más grandes del mundo. Los síntomas de deficiencia de Mg se observaron en todas las áreas del campo cuando no hubo aplicaciones de Mg.

El aumento de la fertilización con Mg amplificó el rendimiento de semillas en todos los sitios estudiados. Los mayores aumentos en el rendimiento de semillas por el Mg se encontraron en los lugares donde las concentraciones de Mg y K extraíbles en el suelo fueron de 28.1 y 279.5 mg kg^{-1} , respectivamente.

La fertilización con Mg es una práctica agronómica para mejorar el rendimiento vegetal. Sin embargo, no se han examinado sus impactos sobre la calidad vegetal y la salud humana. Por lo tanto, Lu et al. (2021) investigaron los efectos de dosis de fertilización con Mg en el rendimiento y la calidad del pimiento (*Capsicum annuum*).

En comparación con el control, el Mg aumentó el rendimiento durante 2 años en 25.6%, mientras que no hubo una mejora significativa del rendimiento cuando la fertilización con Mg excedió los $112.5 \text{ kg MgO ha}^{-1}$. Los autores concluyen que la fertilización con Mg mejoró el rendimiento, pero redujo la calidad nutricional del pimiento y aumentó los riesgos para la salud humana asociados con su consumo.

La investigación de El-Badawy (2019) analizó el efecto de aspersiones foliares de sulfato de K y de Mg, así como su combinación para asegurar un crecimiento óptimo y productividad máxima en la vid (*V. vinifera*) sin semilla Cv. Crimson. Los resultados mostraron que la mayor área foliar y la caña más gruesa resultaron de las combinaciones de K, especialmente las que recibieron Mg a nivel alto (300 ppm) durante las dos temporadas de estudio (2016 y 2017).

Se reporta que la concentración de ROS disminuyó con un suministro adecuado de Mg en 31%, en comparación con las plantas deficientes en Mg, lo que resulta en una disminución de actividades y señalización de la mayoría de las enzimas antioxidantes y metabolitos en plantas de frijol, cuando hay un suministro inadecuado de Mg (Cakmak y Kirkby, 2008).

RESPUESTAS BIOLÓGICAS DEBIDO A NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE MAGNESIO

Estudios pioneros sobre el uso de NPsMg en plantas, como el de Tewari et al. (2006), analizaron NPs esféricas de OMg con tamaños de 38 a 57 nm para estudiar los mecanismos de reparación oxidativa celular para reducir la absorción y translocación de arsénico (As) en plantas de arroz (*Oryza sativa* L.).

Los resultados revelaron que la aplicación de NPsMgO (200 mg kg⁻¹) en suelo contaminado con As, aumentó la biomasa vegetal, los contenidos enzimáticos antioxidantes y disminuyó las ROS, así como la translocación de As por el xilema, en comparación con el tratamiento control. El estudio concluyó que las NPsOMg biogénicas podrían usarse para formular un potente nanofertilizante.

El OMg es muy versátil, con amplias aplicaciones en la ciencia de los materiales y el diagnóstico biomédico. Sin embargo, la toxicidad de las NPsMgO para las células y los órganos bacterianos/humanos sigue sin aclararse. Un trabajo sobre el uso y aplicación de nanopartículas de óxido de magnesio (NPsOMg) fue realizado por Patel et al. (2013), en el que se observó una clara inhibición del crecimiento bacteriano, pero no se encontró citotoxicidad en células intestinales humanas ni en células cancerosas con las concentraciones más bajas (<300 µg/ml). Los autores concluyeron que este experimento

revela el posible uso de NPsOMg en humanos y bacterias.

Analizando NPsMg biosintetizadas de extractos de *Aspergillus brasilensis* y su efecto al aplicarlas foliarmente en plantas de trigo, Rathore y Tarafdar (2015) encontraron que la dosis de 20 ppm penetró por los estomas, evitando la interacción directa con el sistema suelo y eliminando así posibles riesgos ecológicos.

Los resultados revelaron que las NPs mejoraron la absorción de luz solar (24.9%), además se una mejoró la longitud y biomasa de la raíz debido a la aplicación del nano-Mg. El rendimiento de grano y biomasa seca bajo condiciones de invernadero mejoró entre 38.7 y 63.2%, respectivamente. Los resultados sugirieron que las NPsMg biosintetizadas tienen potencial para mejorar la producción de cultivos.

Por su parte, Karimiyan et al. (2015) analizaron el efecto antifúngico de NPsOMg, óxido de zinc, óxido de silicio y óxido de cobre, contra la levadura *Candida albicans*. Los resultados muestran que las NPsOMg, tienen propiedades únicas, como una alta relación superficie/volumen que es adecuado para agentes antimicrobianos. Los autores concluyen que independientemente de su mecanismo de acción, nano ZnO y nano CuO, pueden ser efectivos contra *C. albicans*.

El estudio de Imada et al. (2016), investigó la resistencia en plantas de tomate por NPsOMg contra la enfermedad causada por la bacteria *Ralstonia solanacearum*. Las raíces de las plántulas de tomate se inocularon con *R. solanacearum* y luego se trataron con NPsOMg; las plantas tratadas mostraron muy poca inhibición del marchitamiento bacteriano. Por el contrario, cuando las raíces se empaparon con una suspensión de NPsOMg antes de la inoculación con el patógeno, la incidencia de la enfermedad se redujo significativamente.

Hayat et al (2018) encontraron que el tratamiento con NPsOMg aceleró la ruptura de la membrana bacteriana, medida en función de la salida de proteínas celulares. Esta pérdida citológica fue mayor entre las bacterias Gram negativas. Las NPsOMg redujeron el porcentaje de formación de una biopelícula entre 31 y 82.9 %, además, las NPs redujeron la biomasa de las biopelículas.

Los experimentos de citotoxicidad revelaron que las NPsOMg no son tóxicas para las células en dosis de 15 a 120 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Estos datos proporcionan evidencia científica *in vitro* de que las NPsOMg son agentes antibiopelículas eficaces y seguras que inhiben su adhesión y su eliminación en bacterias multirresistentes.

Evaluando la promoción de la germinación de semillas y crecimiento de plántulas de *Zea mays* debido a la aplicación de NPsOMg biosintetizadas de *Aspergillus niger*, el trabajo de Shinde et al., (2020) reportó que las plántulas cultivadas en medio MS suplementado con $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{NP}$, promovieron un aumento en la altura de brotes y la longitud de la raíz. Sin embargo, cuando se aplicó el Mg a granel (micropartículas) en dosis de 500 ppm, las plantas de maíz mostraron menor longitud de brotes y raíz.

Estos autores señalan que los mecanismos involucrados en la germinación de semillas de *Zea mays* en presencia de $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{NPs}$ se debe a que: (1) Las NPs aumentan la capacidad de absorción de agua y nutrientes de las semillas. (2) La rápida absorción de agua por las semillas, solubiliza el ácido giberélico presente en el embrión y se transporta al tejido de la semilla y al citoplasma, donde ahí produce la enzima amilasa, la cual hidroliza el almidón de la semilla en azúcares y proporciona energía a las células de la semilla necesarias para la germinación.

(3) Las NPs ayudan a aumentar el nivel de nitrato reductasa en el embrión, lo que mejora la capacidad de las semillas para absorber y utilizar agua y otros nutrientes, promover los sistemas antioxidantes y la germinación de las semillas. (4) Finalmente las NPs ayudan a reducir el estrés antioxidativo al reducir el H_2O_2 y los radicales superóxido, lo que mejora las actividades de las enzimas clave en la germinación de las semillas.

Para investigar los efectos de diferentes fuentes de fertilizantes de Mg, como sulfato de magnesio (MgSO_4), MgO y NPsOMg en el crecimiento y desarrollo del algodón, Kanjana (2020) realizó un experimento en macetas. La aplicación foliar de 60 ppm de NPsOMg de 50 nm de diámetro, aumentó el número de cápsulas abiertas por planta (20.6%), la biomasa (58 g/planta) y el rendimiento de semilla de algodón (1,729 kg/ha). El incremento en el rendimiento fue de 42.2, 39.9 y 24.8%, al aplicar NPsOMg, MgO y MgSO_4 respectivamente.

Las NPs interactúan con las plantas para inducir un efecto positivo, negativo o neutral en su crecimiento y desarrollo. El estudio de Sharma et al. (2022), documentó la influencia positiva de las NPsOMg en *Macrotyloma uniflorum*. Esta leguminosa rica en proteínas y polifenoles, es parte importante de la dieta y nutrición humana.

Cuando se usaron NPsOMg hubo un incremento en la longitud radicular, la biomasa fresca y el contenido de clorofila en *M. uniflorum*. Además, aumentó de 4 a 20% y de 18 a 127%, la acumulación de carbohidratos y proteínas. Los fenoles y flavonoides totales también crecieron entre 7 y 20% y entre 50 y 84% respectivamente en presencia de NPsOMg. La actividad enzimática de SOD, CAT y APX también mejoró en plantas de *M. uniflorum* expuestas a NPsOMg.

EFFECTOS DE NPSMG CONTRA EL ESTRÉS BIÓTICO Y ABIÓTICO

Aunque se han reportado funciones protectoras de las NPs en algunas plantas, hay pocos datos sobre las NPsMg para aliviar el estrés por sequía. Por lo tanto, el experimento de campo realizado por Ojagh y Moaveni (2022), analizó los cambios bioquímicos y los aceites esenciales (AE) de *Achillea millefolium* L. bajo estrés por sequía y NPsMg.

Los resultados mostraron que el estrés hídrico condujo a una mayor fuga de electrolitos, prolina, carotenoides, antocianinas y contenido total de flavonoides. Sin embargo, el rendimiento de flores y el rendimiento de AE fue menor en plantas expuestas a estrés por sequía, en comparación con plantas bajo condiciones de riego adecuado. Las dosis de 0.3 y 0.5 g L⁻¹ de NPsMg fueron más efectivos para aliviar el estrés hídrico.

Respecto al cultivo de zanahoria (*Daucus carota*) Faiz et al. (2022) observaron los efectos de la NPsMgO (5 mmol/L) en el crecimiento de *D. carota* bajo estrés por plomo (Pb). El estrés por este metal disminuyó el crecimiento y la tasa fotosintética de zanahoria. Además, las plantas estresadas mostraron una menor absorción de nutrientes minerales (Zn, Na, Fe, K, Ca, Mg, K y Cu).

De manera similar, las plantas estresadas por Pb expusieron una mayor fuga de electrolitos y contenido de malondialdehído (MDA). Sin embargo, las NPsMgO detoxificaron las ROS para mitigar el estrés por Pb y mejoraron el crecimiento vegetal. Las NPsMgO también aumentaron la actividad de las enzimas antioxidantes, incluidas la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT).

El rendimiento de los cultivos agrícolas se ve reducido por las variaciones continuas de las condiciones ambientales, incluidos los estreses abióticos y bióticos. Chandel et al. (2022) consignan que el uso de NPs tiene el potencial de compensar los efectos nocivos de

estos estreses y aumentar la productividad de la planta. La aplicación de productos químicos sintéticos, incluidos fungicidas, herbicidas e insecticidas para mantener un rendimiento óptimo de los cultivos, no solo tiene como objetivo la flora y la fauna específicas de los campos, sino que también mata otras especies beneficiosas que perturban el equilibrio del ecosistema.

Las NPs se consideran una herramienta eficaz y prometedora para regular el rendimiento de los cultivos y superar las limitaciones actuales y futuras de la producción agrícola al aumentar los mecanismos de tolerancia en las plantas bajo condiciones de estrés abiótico. El efecto mitigador de las NPs sobre el estrés por sequía es originado por la inducción de la regulación fisiológica y bioquímica y la regulación de la expresión de genes relacionados con la respuesta/tolerancia a la sequía.

Seleiman et al. (2020), señalan que las NPs mejoran la actividad fotosintética de las plantas afectadas por la sequía, optimizan el crecimiento radicular, la regulación positiva de las acuaporinas; por lo que la acumulación de solutos compatibles y la homeostasis iónica, son los principales mecanismos por los cuales las NPs alivian el estrés osmótico causado por la deficiencia de agua. Las NPs reducen la pérdida de agua de las hojas causada por la acumulación de ABA mediante el cierre de estomas y mejoran el daño por estrés oxidativo al reducir las ROS y al activar los sistemas de defensa antioxidantes.

El estudio de Nguyen et al. (2018) investigó los efectos de las NPsMgO sobre la resistencia de plantas de tomate contra *R. solanacearum*, así como su actividad antibacteriana. Las raíces de las plántulas de tomate se inocularon con el patógeno y luego se trataron con NPsMgO; las plantas tratadas mostraron muy poca inhibición por el marchitamiento bacteriano.

Por el contrario, cuando las raíces se empararon antes de la inoculación con una suspensión de NPsMgO, la incidencia de la enfermedad se redujo. Se observó una generación rápida de ROS, como los radicales O_2^- , en raíces de tomate tratadas con NPsMgO. Se generó más O_2^- cuando se agregaron extractos de plantas de tomate o polifenoles a la suspensión de NPsOMg. Esto sugiere que la generación de O_2^- en las raíces del tomate podría deberse a una reacción entre NPsMgO y los polifenoles presentes en las raíces.

El Mg es un elemento mineral esencial para las plantas y no es tóxico para los organismos. Cai et al. (2018) investigaron los mecanismos antibacterianos de las NPsOMg contra *R. solanacearum* bajo condiciones *in vitro* e *in vivo*. Esta fitobacteria causa la marchitez bacteriana, que provoca una reducción mundial de la producción de tabaco. Los resultados muestran que las NPsMgO poseen una actividad antibacteriana dependiente de la concentración mínima inhibitoria (CMI) y la concentración mínima bactericida (CMB), las cuales fueron 200 y 250 $\mu\text{g}/\text{mL}$ respectivamente.

La evaluación de fitotoxicidad en condiciones de invernadero demostró que las NPsMgO ejercieron un gran efecto contra *R. solanacearum*, reduciendo el índice de marchitez bacteriana. En conjunto, los resultados sugieren que el uso de NPsMgO como agentes antibacterianos alternativos se convertirá en un nuevo tema de investigación para el control de fitoenfermedades.

La mancha bacteriana del arroz es la enfermedad de mayor importancia económica causada por *Acidovorax oryzae*. Para garantizar la seguridad alimentaria y el consumo seguro, es necesario un enfoque sustentable. En el trabajo de Ogunyemi et al. (2019), las NPsMgO y NPsMnO₂ con tamaños de 18.2 y 16.5 nm se sintetizaron del extracto de flor de manzanilla.

Ambos tipos de NPs redujeron el crecimiento de *A. oryzae* en 62.9 y 71.3%, respectivamente. Los mecanismos antibacterianos de las NPsMgO y NPsMnO₂ revelan, que ambos tipos de NPs destruyeron la membrana celular y penetraron a su interior, lo que provocó la fuga del contenido citoplasmático y finalmente la muerte. En conjunto, los resultados sugieren que las NPsMgO y NPsMnO₂ biosintetizadas podrían servir como una herramienta alternativa para el manejo de mancha bacteriana del arroz.

CONSIDERACIONES FINALES

La nanotecnología mediante la síntesis y biosíntesis de NPs apoya el desarrollo tecnológico de la agricultura, al diseñar y producir nanocompuestos con base en carbón o metales, los cuales actúan como nanofertilizantes, nanoplaguicidas, nanoherbicidas, etc. Los agroquímicos tradicionales son usados para mantener un rendimiento óptimo de los cultivos, pero los plaguicidas no solo tienen como objetivo la flora y fauna dañina específica, sino que también matan otras especies beneficiosas que son requeridas para mantener el equilibrio del agroecosistema.

Las NPs interactúan con las plantas para inducir un efecto positivo, negativo o neutral, en su crecimiento y desarrollo, así como en la generación de resistencia a enfermedades y a los estreses bióticos y abióticos. Las NPs también aumentan la acumulación de carbohidratos, proteínas, fenoles y flavonoides totales, así como la actividad de enzimas antioxidantes como SOD, CAT y APX., para inducir resistencia a la presencia de plagas y enfermedades, así como de factores abióticos (salinidad, sequía, metales pesados, etc).

La NT tienen un alto potencial para minimizar el uso de productos químicos tóxicos como pesticidas, fungicidas, insecticidas y herbicidas, para combatir el

estrés ambiental, por lo que pueden reducir el nivel de polución de los contaminantes en el aire, las aguas subterráneas y el suelo. Se necesita más investigación a múltiples niveles, incluidos los niveles moleculares y celulares de las plantas, para que los nanomateriales alivien el daño causado por diversos estreses ambientales en los cultivos agrícolas.

Se considera a las NPs como una herramienta eficaz y prometedora para regular el rendimiento de los cultivos y superar las limitaciones actuales y futuras de la producción agrícola al aumentar los mecanismos de tolerancia en las plantas bajo condiciones de estrés biótico y abiótico. El efecto mitigador de las NPs sobre el estrés por sequía es originado por la inducción de la regulación fisiológica y bioquímica y la regulación de la expresión de genes relacionados con la respuesta o tolerancia a la sequía. Las NPs facilitan la penetración por los microporos encontrados en la epidermis, estomas y lenticelos, lo que ayuda a la germinación de semillas y al crecimiento de las plantas; además, el área superficial aumentada de las NPs, les permite una mayor adsorción y una entrega controlada de agroquímicos, ya sea dentro de las plantas, el suelo o el agua de riego.

Por otro lado, el Mg es un elemento mineral esencial para las plantas y no es tóxico para los organismos. Se podría llamar el elemento olvidado en la producción de cultivos, ya que su abastecimiento y su necesidad suelen subestimarse. El Mg es un nutriente básico para una amplia gama de procesos fisiológicos y bioquímicos fundamentales en las plantas, incluyendo la fotosíntesis, partición de carbohidratos, así como la síntesis de proteínas. Por eso, su deficiencia es un problema que afecta la productividad y la calidad en todos los sistemas agrícolas y forestales.

También se ha documentado científicamente que las NPs de Mg u MgO mejoran la actividad fotosintética de las plantas afectadas por la sequía, optimizan el crecimiento radicular y la regulación de las acuaporinas; por lo que la acumulación de solutos compatibles y la homeostasis iónica, son los principales mecanismos por los cuales las NPs alivian el estrés osmótico causado por la deficiencia de agua. Las NPs también reducen la pérdida de agua de las hojas causada por la acumulación de ABA mediante el cierre de estomas y mejoran el daño por estrés oxidativo al reducir las ROS y al activar los sistemas de defensa antioxidantes.

Las nanopartículas de óxido de magnesio han mostrado un buen efecto antimicrobiano, inclusive en dosis de 200 µg, han mostrando una actividad antimicrobial y anticancerígena eficiente. Debido a todo lo antes señalado, los resultados de investigación sugieren que el uso de NPs MgO como agentes nutritivos y antibacterianos, se convertirán en opciones alternativas para la producción agrícola sustentable, al aplicar dosis significativamente más pequeñas, lo que quizá resulte en menores costos del paquete tecnológico usado por los agricultores para la producción de cultivos hortícolas, frutícolas y de grano.

REFERENCIAS

- Abdul-Sahib, A. M., Golbashy, M. y Abbass, J. (2023). Effect of date palm wastes, perlite and magnesium on growth and flowering in gerbera plants (*Gerbera jamesonii* L.). *International Journal of Horticultural Science and Technology*, 10(4), 375-386.
- Ahmed, T., Noman, M., Manzoor, N., Shahid, M., Hussaini, K.M., Rizwan, M. y Li, B. (2021). Green magnesium oxide nanoparticles-based modulation of cellular oxidative repair mechanisms to reduce arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Environmental Pollution*, 288, 117785.
- Alawi A.M., Majoni S.W. y Falhammar H. (2018). Magnesium and human health: perspectives and research directions. *Int. J. Endocrinol*, 9041694. 10.1155/2018/9041694.
- Ba, Q., Zhang, L., Chen, S., Li, G. y Wang, W. (2020). Effects of foliar application of magnesium sulfate on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and its translocation, and carbohydrate metabolism in grain during wheat grain filling. *Cereal Research Communications*, 48(2), 157-163.
- Barroso, F.D.L., Milagres, C.D.C., Fontes, P.C.R. y Cecon, P.R. (2021). Magnesium-influenced seed potato development and yield. *Journal of Plant Nutrition*, 44(2), 296-308.
- Boaretto, R.M., Hippler, F.W., Ferreira, G.A., Azevedo, R.A., Quaggio, J.A. y Mattos, D. (2020). The possible role of extra magnesium and nitrogen supply to alleviate stress caused by high irradiation and temperature in lemon trees. *Plant and Soil*, 457(1), 57-70.
- Bücking, H., Kuhn, A.J., SchroËder, W.H. y Heyser, W. (2002). The fungal sheath of ectomycorrhizal pine roots: an apoplastic barrier for the entry of calcium, magnesium, and potassium into the root cortex?. *Journal of Experimental Botany*, 53(374), 1659-1669.
- Cai, L., Chen, J., Liu, Z., Wang, H., Yang, H. y Ding, W. (2018). Magnesium oxide nanoparticles: effective agricultural antibacterial agent against *Ralstonia solanacearum*. *Frontiers in Microbiology*, 9, 790.
- Cakmak, I., Hengeler, C. y Marschner, H. (1994). Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus, potassium and magnesium deficiency in bean plants, *J. Exp. Bot.* 45: 1251–1257.
- Cakmak, I. y Kirkby, E.A. (2008). Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia plantarum*, 133(4): 692-704.
- Crusciol, C.A.C., Moretti, L.G., Bossolani, J.W., Moreira, A., Micheri, P.H. y Rossi, R. (2019). Can dunite promote physiological changes, magnesium nutrition and increased corn grain yield?. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(18): 2343-2353.
- Chandel, S.S., Shree, B., Mondal, K. y Mali, S. (2022). Mechanism of nanoparticles-mediated alleviating biotic and abiotic stresses in agricultural crops: Recent advances and future perspectives. *The Role of Nanoparticles in Plant Nutrition under Soil Pollution: Nanoscience in Nutrient Use Efficiency*, 117-139.
- Chaudhry, A.H., Nayab, S., Hussain, S.B., Ali, M. y Pan, Z. (2021). Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(4), 1819.
- Chen, Z.C., Peng, W.T., Li, J. y Liao, H. (2018, February). Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. In *Seminars in cell & developmental biology* (Vol. 74, pp. 142-152). Academic Press.
- de Bang, T.C., Husted, S., Laursen, K.H., Persson, D.P. y Schjoerring, J.K. (2021). The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *New Phytologist*, 229(5), 2446-2469.
- El-Badawy, H.E.M. (2019). Implication of using potassium and magnesium fertilization to improve growth, yield and quality of crimson seedless grapes (*Vitis vinifera* L.). *Journal of Plant Production*, 10(2), 133-141.
- Deng, N., Zhu, H., Xiong, J., Gong, S., Xie, K., Shang, Q. y Yang, X. (2023). Magnesium deficiency stress in rice can be alleviated by partial nitrate nutrition supply. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 463-471.
- Farhat, N., Elkhouni, A., Zorrig, W., Smaoui, A., Abdelly, C. y Rabhi, M. (2016) Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning, *Acta Physiol. Plant.* 38: 145.
- Faiz, S., Yasin, N.A., Khan, W.U., Shah, A.A., Akram, W., Ahmad, A. y Riaz, L. (2022). Role of magnesium oxide nanoparticles in the mitigation of lead-induced stress in *Daucus carota*: modulation in polyamines and antioxidant enzymes. *International Journal of Phytoremediation*, 24(4), 364-372.

- Fatima, Z., Ahmed, M., Hussain, M., Abbas, G., Ul-Allah, S., Ahmad, S. y Hussain, S. (2020). The fingerprints of climate warming on cereal crops phenology and adaptation options. *Scientific Reports*, 10(1), 1-21.
- Garcia, A., Crusciol, C.A.C., Rosolem, C.A., Bossolani, J.W., Nascimento, C.A.C., McCray, J.M. y Cakmak, I. (2022). Potassium-magnesium imbalance causes detrimental effects on growth, starch allocation and Rubisco activity in sugarcane plants. *Plant and Soil*, 1-14.
- Geng, G., Cakmak, I., Ren, T., Lu, Z. y Lu, J. (2021). Effect of magnesium fertilization on seed yield, seed quality, carbon assimilation and nutrient uptake of rapeseed plants. *Field Crops Research*, 264: 108082.
- Gransee, A. y Führs, H. (2013) Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant Soil* 368: 5–21.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z. y Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: an urgent problem. *The Crop Journal* (9) 249–256.
- Hauer-Jákli, M. y Tränkner, M. (2019). Critical leaf magnesium thresholds and the impact of magnesium on plant growth and photo-oxidative defense: a systematic review and meta-analysis from 70 years of research. *Frontiers in Plant Science*, 10, 766.
- He, H., Jin, X., Ma, H., Deng, Y., Huang, J. y Yin, L. (2020). Changes of plant biomass partitioning, tissue nutrients and carbohydrates status in magnesium-deficient banana seedlings and remedy potential by foliar application of magnesium. *Scientia Horticulturae*, 268, 109377.
- Hermans, C., Johnson, G.N., Strasser, R.J. y Verbruggen, N. (2004). Physiological characterisation of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta*, 220, 344-355.
- Holland, J.E., Bennett, A.E., Newton, A.C., White, P.J., McKenzie, B.M., George, T.S., Pakeman, R.J., Bailey, J.S., Fornara, D.A. y Hayes, R.C. (2018). Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review, *Sci. Total Environ.* 610-611: 316–332.
- Hayat, S., Muzammil, S., Rasool, M. H., Nisar, Z., Hussain, S. Z., Sabri, A. N. y Jamil, S. (2018). In vitro antibiofilm and anti-adhesion effects of magnesium oxide nanoparticles against antibiotic resistant bacteria. *Microbiology and immunology*, 62(4), 211-220.
- Imada, K., Sakai, S., Kajihara, H., Tanaka, S. y Ito, S. (2016). Magnesium oxide nanoparticles induce systemic resistance in tomato against bacterial wilt disease. *Plant Pathology*, 65(4), 551-560.
- Ishfaq, M., Wang, Y., Yan, M., Wang, Z., Wu, L., Li, C. y Li, X. (2022). Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of china. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Kanjana, D. (2020). Foliar application of magnesium oxide nanoparticles on nutrient element concentrations, growth, physiological, and yield parameters of cotton. *Journal of Plant Nutrition*, 43(20), 3035-3049.
- Karimiyan, A., Najafzadeh, H., Ghorbanpour, M. y Hekmati-Moghaddam, S.H. (2015). Antifungal effect of magnesium oxide, zinc oxide, silicon oxide and copper oxide nanoparticles against *Candida albicans*. *Zahedan Journal of Research in Medical Sciences*, 17(10).
- Koch, M., Busse, M., Naumann, M., Jákli, B., Smit, I., Cakmak, I. y Pawelzik, E. (2019). Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiologia plantarum*, 166(4), 921-935.
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A. y Thiel, H. (2020). The importance of nutrient management for potato production Part I: Plant nutrition and yield. *Potato research*, 63(1): 97-119.
- Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Bolan, N., Xu, S. Mandal, D. Gleeson, B. Seshadri, M. Zaman, L. Barton y Tang, C. (2016). Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. *Adv. Agron.* 139: 1–71.
- Li, J., Hu, X., Zhang, R., Li, Q., Xu, W., Zhang, L. y Wang, M. (2023). The plasma membrane magnesium transporter CsMGT5 mediates magnesium uptake and translocation under magnesium limitation in tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Scientia Horticulturae*, 310, 111711.
- Li, H., Chen, Z., Zhou, T., Liu, Y., Raza, S. y Zhou, J. (2018). Effects of high potassium and low temperature on the growth and magnesium nutrition of different tomato cultivars. *Hort. Sci.* 53: 710–714.
- Li, J., Yokosho, K., Liu, S., Cao, H.R., Yamaji, N., Zhu, X.G. y Chen, Z.C. (2020). Diel magnesium fluctuations in chloroplasts contribute to photosynthesis in rice. *Nature Plants*, 6(7): 848-859.

- Li, X., Teng, L., Fu, T., He, T. y Wu, P. (2022). Comparing the effects of calcium and magnesium ions on accumulation and translocation of cadmium in rice. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(27), 41628-41639.
- Lu, M., Liu, D., Shi, Z., Gao, X., Liang, Y., Yao, Z. y Chen, X. (2021). Nutritional quality and health risk of pepper fruit as affected by magnesium fertilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(2), 582-592.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, London, UK.
- Mikkelsen, R. (2010). Soil and fertilizer magnesium. *Better Crops*, 94(2): 26-28.
- Nguyen, N.Y.T., Grelling, N., Wetteland, C.L., Rosario, R. y Liu, H. (2018). Antimicrobial activities and mechanisms of magnesium oxide nanoparticles (nMgO) against pathogenic bacteria, yeasts, and biofilms. *Scientific reports*, 8(1), 1-23.
- Ogunyemi, S.O., Zhang, F., Abdallah, Y., Zhang, M., Wang, Y., Sun, G. y Li, B. (2019). Biosynthesis and characterization of magnesium oxide and manganese dioxide nanoparticles using *Matricaria chamomilla* L. extract and its inhibitory effect on *Acidovorax oryzae* strain RS-2. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), 2230-2239.
- Ojagh, S.E. y Moaveni, P. (2022). Foliar-applied magnesium nanoparticles modulate drought stress through changes in physio-biochemical attributes and essential oil profile of yarrow (*Achillea millefolium* L.). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 59374-59384.
- Oliveira, I.P.D., Asher, C.J., Edwards, D.G. y Santos, R.S.M.D. (2000). Magnesium sulphate and the development of the common bean cultivated in an Ultisol of Northeast Australia, *Sci. Agric.* 57: 153-157.
- Patel, M.K., Zafaryab, M., Rizvi, M., Agrawal, V.V., Ansari, Z.A., Malhotra, B.D. y Ansari, S.G. (2013). Antibacterial and cytotoxic effect of magnesium oxide nanoparticles on bacterial and human cells. *Journal of nanoengineering and nanomanufacturing*, 3(2), 162-166.
- Quddus, M.A., Siddiky, M.A., Hussain, M.J., Rahman, M.A., Ali, M.R. y Masud, M.A.T. (2022). Magnesium influences growth, yield, nutrient uptake, and fruit quality of tomato. *International Journal of Vegetable Science*, 28(5): 441-464.
- Rathore, I. y Tarafdar, J. C. (2015). Perspectives of biosynthesized magnesium nanoparticles in foliar application of wheat plant. *Journal of Bionanoscience*, 9(3), 209-214.
- Refaie, M.M., Merghany, M.M., Khalil, M.M. y Kabil, F.F. (2020). Microtuber and minituber manipulation for potato pre-basic seed production under Egyptian conditions. *Plant Archives*, 20(2), 2159-2164.
- Rodrigues, V.A., Crusciol, C.A.C., Bossolani, J.W., Moretti, L.G., Portugal, J.R., Mundt, T.T. y Lollato, R.P. (2021). Magnesium foliar supplementation increases grain yield of soybean and maize by improving photosynthetic carbon metabolism and antioxidant metabolism. *Plants*, 10(4), 797.
- Seleiman, M.F., Almutairi, K.F., Alotaibi, M., Shami, A., Alhammad, B.A. y Battaglia, M.L. (2020) Nano-fertilization as an emerging fertilization technique: why can modern agriculture benefit from its use? *Plants*, 10, 2.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V. y Thiel, H. (2015). Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum, *Crop Pasture Sci.* 66 1219.
- Sharma, P., Gautam, A., Kumar, V. y Guleria, P. (2022). In vitro exposed magnesium oxide nanoparticles enhanced the growth of legume *Macrotyloma uniflorum*. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
- Sharma, A., Sharma, H. y Upadhyay, S.K. (2022). Cation transporters in plants: an overview. *Cation transporters in plants*, 1-28.
- Shaul, O. (2002). Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg, *Biometals* 15: 307-321.
- Shinde, S., Paralikar, P., Ingle, A.P. y Rai, M. (2020). Promotion of seed germination and seedling growth of *Zea mays* by magnesium hydroxide nanoparticles synthesized by the filtrate from *Aspergillus niger*. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 3172-3182.
- Song, Y., Zheng, C., Li, S., Chen, J. y Jiang, M. (2023). Chitosan-Magnesium oxide nanoparticles improve salinity tolerance in rice (*Oryza sativa* L.). *ACS Applied Materials & Interfaces*.
- Tang, R.J. y Luan, S. (2020). Rhythms of magnesium. *Nature Plants*, 6(7), 742-743.
- Tamura, H., Saito, K. y Ishikita, H. (2020). Acquirement of water-splitting ability and alteration of the charge-separation mechanism in photosynthetic reaction centers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(28), 16373-16382.

Tian, G., Liu, C., Xu, X., Xing, Y., Liu, J., Lyu, M. y Ge, S. (2023). Effects of Magnesium on nitrate uptake and sorbitol synthesis and translocation in apple seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 139-151.

Tränkner, M., Tavakol, E. y Jáklí, B. (2018). Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection, *Physiol. Plant.* 163: 414–431.

Tewari, R.K., Kumar, P. y Sharma, P.N. (2006). Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. *Scientia horticulturae*, 108(1), 7-14.

Verbruggen, N. y Hermans, C. (2013) Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant Soil* 368:87–99.

Wang, J., Wen, X., Zhang, X., Li, S. y Zhang, D.Y. (2018). Co-regulation of photosynthetic capacity by nitrogen, phosphorus and magnesium in a subtropical Karst forest in China. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9.

Wang, Z., Hassan, M.U., Nadeem, F., Wu, L., Zhang, F. y Li, X. (2020). Magnesium fertilization improves crop yield in most production systems: a meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 1727.

Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F. y Guo, S. (2021). Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, 9(2), 249-256.

Xie, K., Lu, Z., Pan, Y., Gao, L., Hu, P., Wang, M. y Guo, S. (2020). Leaf photosynthesis is mediated by the coordination of nitrogen and potassium: the importance of anatomical-determined mesophyll conductance to CO₂ and carboxylation capacity, *Plant Sci.* 290: 110267.

Yan, B., Sun, Y.Y. y Wei, Y. (2020). Potassium–calcium antagonistic interaction under tomato magnesium deficiency and magnesium fertiliser regulation in solar greenhouse. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 12(3), 76-86.

Yan, B. y Hou, Y. (2018). Effect of soil magnesium on plants: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 170, No. 2, p. 022168). IOP Publishing.

Ye, X., Chen, X.F., Deng, C.L., Yang, L.T., Lai, N.W., Guo, J.X. y Chen, L.S. (2019). Magnesium-deficiency effects on pigments, photosynthesis and photosynthetic electron transport of leaves, and nutrients of leaf blades and veins in *Citrus sinensis* seedlings. *Plants*, 8(10), 389.

Yuguan, Z., Min, Z., Luyang, L., Zhe, J., Chao, L., Sitao, Y., Yanmei, D., Na, L. y Fashui, H. (2009). Effects of cerium on key enzymes of carbon assimilation of spinach under magnesium deficiency. *Biol Trace Elem Res* 131:154–164.