

MAGNESIO: EL ELEMENTO OLVIDADO EN LA PRODUCCION DE CULTIVOS

Ismail Cakmak y Atilla M. Yazici*

Introducción

El magnesio (Mg) interviene en varias funciones vitales para la planta. Los procesos metabólicos y reacciones en las cuales interviene el Mg son: 1) Fotofosforilación (formación de ATP en los cloroplastos), 2) fijación fotosintética del dióxido de carbono (CO_2), 3) síntesis de proteínas, 4) formación de clorofila, 5) recarga del floema, 6) partición y asimilación de los productos de la fotosíntesis, 7) generación de las formas reactivas de oxígeno y 8) fotooxidación de los tejidos de las hojas. En consecuencia, varios procesos fisiológicos y bioquímicos críticos para la planta se alteran cuando existe deficiencia de Mg, afectando el crecimiento y el rendimiento de la planta. En la mayoría de los casos la intervención del Mg en procesos metabólicos radica en la activación de numerosas enzimas. Una importante enzima activada por Mg es la ribulosa-1.5-bisfosfato (RuBP) carboxilasa, que es una enzima básica en el proceso de fotosíntesis y la enzima más abundante en la tierra.

El amarillamiento en forma de clorosis intervenal en las hojas viejas de la planta es uno de los síntomas típicos del estrés causado por la deficiencia de Mg (**Foto 1**). Se conoce que hasta el 35 % del total de Mg en las plantas está ligado a los cloroplastos (**Figura 1**). Sin embargo, la presencia de los síntomas de deficiencia de Mg es altamente dependiente de la intensidad de la luz. La alta intensidad de la luz incrementa la clorosis intervenal y la presencia de manchas de color rojizo en las hojas (**Foto 2**). Por esta razón, las bien documentadas diferencias de la expresión visual de la deficiencia de Mg entre especies, así como la concentración foliar crítica, pueden estar relacionadas con la intensidad de la luz en un ambiente de crecimiento particular.

Se considera que el daño en las hojas en las plantas deficientes en Mg expuestas a alta intensidad de luz se debe a la mayor generación de especies de oxígeno altamente reactivas (muy nocivas) en los cloroplastos, lo que inhibe la fijación fotosintética del CO_2 . Aparentemente, las plantas que crecen bajo condiciones de alta intensidad de luz tienen un mayor requerimiento de Mg que las plantas que crecen bajo condiciones de baja intensidad de luz.

El problema creciente de la deficiencia de Mg

A pesar del conocido papel del Mg en varias funciones críticas en las plantas, es sorprendente la poca

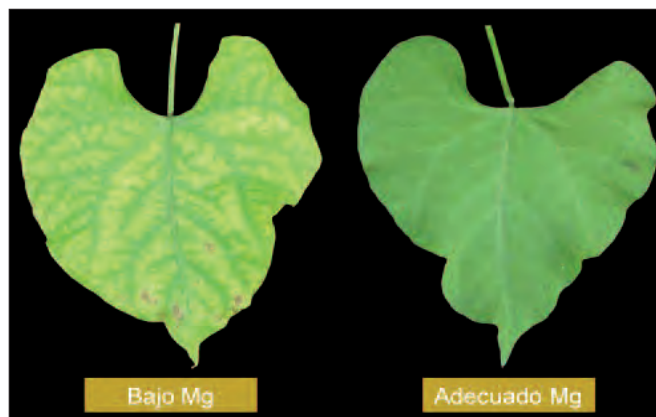


Foto 1. A la izquierda de la foto se presentan síntomas de deficiencia de Mg en hojas de frijol común.

investigación conducida sobre el papel de este nutriente en el rendimiento y en la calidad de los cultivos. Por esta razón, a menudo se ha considerado al Mg como el elemento olvidado. Sin embargo, la deficiencia de Mg ha pasado a ser un importante factor limitante en los sistemas de producción intensivos, especialmente en suelos fertilizados solo con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Existe una preocupación creciente por el agotamiento del Mg en suelos dedicados a agricultura de alta productividad.

Debido al alto potencial de lixiviación de cationes y a la interacción de éstos con el aluminio (Al) en los suelos altamente meteorizados, la deficiencia de Mg es crítica en suelos ácidos. Uno de los más documentados mecanismos de adaptación de la planta a suelos ácidos es la liberación por las raíces de aniones orgánicos ácidos. Estos aniones orgánicos quelatan el Al tóxico formando complejos Al-ácido orgánico que neutralizan la fitotoxicidad del Al. Se ha documentado ampliamente el hecho de que se requiere de Mg para que la planta pueda liberar efectivamente los iones orgánicos ácidos para modificar una rizosfera cargada de Al tóxico (Yang et al., 2007). Al igual que el Mg, el calcio (Ca) es también importante para aliviar la toxicidad de Al en suelos ácidos. Sin embargo, el Mg puede proteger la planta contra la toxicidad de Al cuando se lo añade en niveles micromoleculares, mientras que el Ca ejerce su papel protector en concentraciones milimolares (Silva et al., 2001). Todo esto indica que el Mg tiene efectos muy específicos en la protección de la planta contra la toxicidad de Al.

* Tomado de: Cakmak, I. and A.M. Yazici. 2010. Magnesium: A Forgotten Element in Crop Production. *Better Crops* 94(2):23-25. Los doctores Cakmak y Yazici son profesores de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Sabanci, Estambul, Turquía. Correo electrónico: cakmak@sabanciuniv.edu

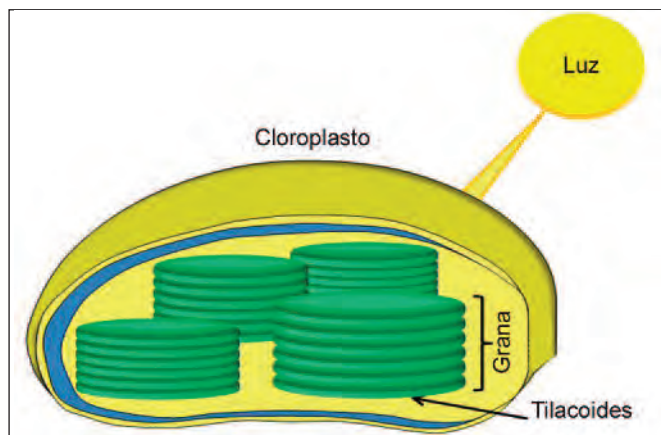


Figura 1. Los cloroplastos son los organelos que alojan los tilacoides, compartimientos que contienen Mg donde la energía de la luz se transforma en energía química a través del proceso de la fotosíntesis.

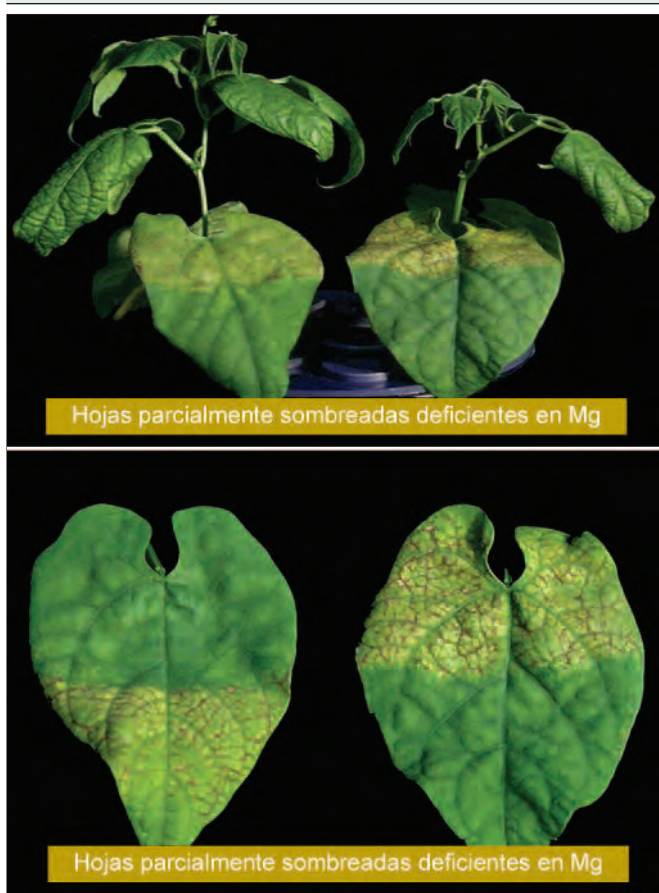


Foto 2. Clorosis en las hojas de frijol común en plantas deficientes en Mg cultivadas en alta intensidad de luz. La parte verde de las hojas estuvo parcialmente sombreada con papel filtro. La alta intensidad de luz no causó ninguna clorosis en la hoja cuando el suplemento de Mg fue adecuado (Cakmak y Kirkby, 2008).

Primeras reacciones a la deficiencia de Mg

En vista de las diversas funciones del Mg, es común la pregunta de cuál sería la función o estructura de la planta que se ve afectada primero cuando existe deficiencia de Mg. La respuesta más común a esta pregunta es que primero se afecta el nivel de clorofila, o la fotosíntesis o

la síntesis de proteínas. Existen estudios publicados por Cakmak et al. (1994a,b) en frijol común, por Hermans et al. (2004) en remolacha azucarera y por Hermans y Verbruggen (2005) en Arabidopsis que proveen una respuesta clara y convincente a esta pregunta, como se discute a continuación.

Hermans et al. (2004) cultivaron remolacha azucarera con un nivel adecuado y uno bajo de Mg y midieron los siguientes parámetros: 1) crecimiento de la planta, 2) fijación fotosintética de CO₂, 3) concentración de clorofila, 4) transporte fotosintético de electrones y 5) concentración de sacarosa en las hojas. Los resultados obtenidos fueron claros. Se observó que existía una alta acumulación de sacarosa en las hojas totalmente expandidas de las plantas deficientes en Mg antes que se presente cualquier cambio notorio en los cuatro primeros parámetros. Las hojas deficientes en Mg acumularon hasta cuatro veces más sacarosa en comparación con las hojas que tenían contenido adecuado de Mg, indicando que existe una severa inhibición del transporte de la sacarosa de las hojas hacia otros órganos de la planta cuando existe deficiencia de Mg.

Cakmak et al. (1994a,b) estudiaron el efecto de la nutrición con Mg en los siguientes factores: 1) crecimiento de la raíz y de la parte aérea de la planta, 2) concentración y distribución de carbohidratos entre la raíz y los órganos de la parte aérea de la planta y 3) exportación de sacarosa por el floema. Este estudio se realizó utilizando frijol y trigo. Los resultados mostraron que existe una pronunciada inhibición del crecimiento de la raíz antes que se observe un cambio notable en el crecimiento de la parte aérea de la planta y en la concentración de clorofila. En consecuencia, la relación parte aérea:raíz se incrementó en las plantas deficientes en Mg (**Foto 3**). Este temprano efecto negativo de la deficiencia de Mg en el crecimiento de la raíz, antes de que se desarrolle una clorosis visible en las hojas, es un aspecto crítico para los agricultores por la importancia de un buen sistema radicular en el rendimiento de la planta. Por esta razón, se debe prestar especial atención al estado de la nutrición con Mg antes que se presente cualquier síntoma de deficiencia en la planta.

La acumulación de carbohidratos en las hojas completamente expandidas es un fenómeno común en las plantas deficientes en Mg. Cakmak et al. (1994a,b) encontraron que la acumulación de Mg fue 3.5 y 9 veces más alta en plantas que empezaban a presentar deficiencia y en plantas bajo severa deficiencia, respectivamente, en comparación con plantas con adecuado suministro de Mg. Las hojas deficientes en Mg también contenían elevadas cantidades de almidón y azúcares reductores. En las plantas de frijol que tuvieron



Foto 3. Crecimiento de plantas de frijol común (superior) y trigo (inferior) con suplemento bajo y adecuado de Mg.

un bajo suplemento de Mg por 12 días solamente se encontró el 1 % del total de carbohidratos de la planta ubicados en la raíz, mientras que en las plantas con adecuado Mg este valor fue de 16 %. Todos estos resultados claramente indican una severa inhibición en la exportación de azúcares por el floema de las hojas deficientes en Mg.

Se colectaron exudados del floema de plantas de frijol con bajo y adecuado suplemento de Mg para estudiar el papel de la nutrición con este nutriente en el movimiento de la sacarosa de la hoja a otras partes de la planta. La deficiencia de Mg provoca severa y muy prematura inhibición en el transporte de sacarosa en el floema (Figuras 2 y 3). Se observó una relación inversa entre la concentración de sacarosa en la hoja y la tasa de sacarosa exportada en el floema durante los 12 días que duró el tratamiento de bajo Mg. El efecto inhibitorio de la

deficiencia de Mg en el transporte de sacarosa vía floema se presentó antes de que aparezca cualquier efecto adverso en el crecimiento de la parte aérea de la planta. La reposición de Mg a las plantas deficientes restauró la exportación de sacarosa en 12 horas.

Estos resultados sugieren que los efectos del Mg en el transporte de la sacarosa por el floema no están relacionados con ningún efecto secundario. El mecanismo por el cual la deficiencia de Mg afecta el transporte de sacarosa por el floema no se conoce completamente, pero aparentemente está relacionado con las bajas concentraciones del complejo Mg-ATP en los sitios donde la sacarosa se carga en el floema. Es consenso general que se requiere Mg-ATP para la apropiada función de la H⁺-ATPasa, una enzima que provee energía para los procesos de carga del floema y mantiene el transporte de la sacarosa entre las células del floema.

Importancia práctica de presencia temprana de deficiencia de Mg

La alta acumulación de carbohidratos, junto con la inhibición de la exportación de sacarosa, de las hojas deficientes en Mg, muestra la importancia de mantener una adecuada nutrición con Mg durante los periodos de intenso transporte de carbohidratos de las hojas a las células en crecimiento en otros sitios de la planta. Se requiere suficiente Mg para maximizar el transporte de carbohidratos hacia los órganos receptores (como raíces y semillas) para promover rendimientos altos. El mantenimiento de una adecuada nutrición con Mg en los estadios tardíos del ciclo de cultivo es también esencial para minimizar la generación de especies de radicales oxígeno dañinos y el daño fotooxidativo en los cloroplastos. La aplicación tarde de Mg en el ciclo por medio de aspersión foliar podría ser una práctica útil en ciertas circunstancias. El efecto negativo en el crecimiento de la raíz causado por la deficiencia de Mg puede tener serio impacto en la absorción de nutrientes y el agua, especialmente bajo condiciones de suelos marginales.

El producir biomasa como una fuente de energía renovable es una alternativa prometedora. Sin embargo, la productividad de estos sistemas es directamente dependiente de: 1) la capacidad de las plantas para fijar CO₂ en carbono orgánico (C), 2) translocación del C asimilado a otros órganos de la planta y 3) utilización del C asimilado en los órganos receptores para su crecimiento. Todos estos pasos son específicos y están controlados por Mg. Por esta razón, se debe prestar atención al estado nutricional de las plantas utilizadas en la producción de biocombustibles para lograr alta producción de biomasa y una adecuada partición del C asimilado a los órganos de la planta donde son necesarios (como granos y raíces).

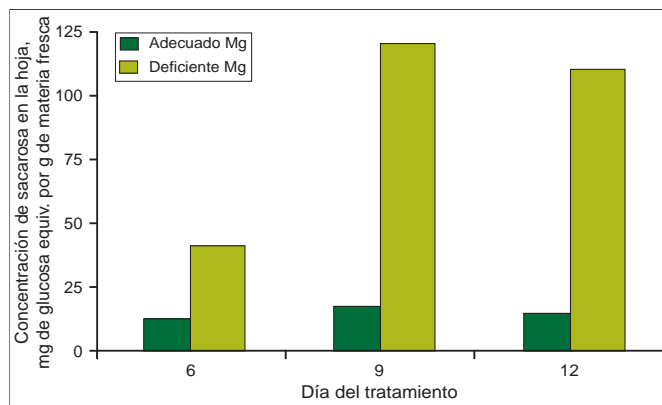


Figura 2. Concentración de sacarosa en plantas de frijol cultivadas con adecuado Mg o con bajo Mg por 12 días (Cakmak et al., 1994b).

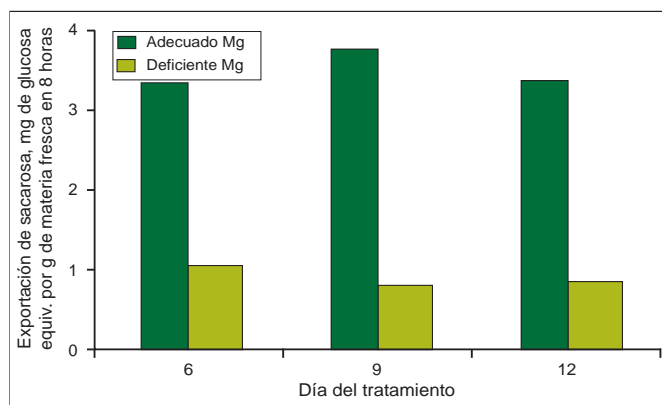


Figura 3. Tasa de exportación de sacarosa en plantas de frijol cultivadas con adecuado Mg o con bajo Mg por 12 días (Cakmak et al., 1994b).

Se conoce desde hace mucho tiempo que el Mg tiene un papel esencial en la formación de la clorofila y la fotosíntesis. Sin embargo, creciente evidencia indica que órganos receptores (como las raíces en crecimiento y las semillas en desarrollo) se afectan severamente cuando existe deficiencia de Mg. El Mg ha sido un elemento olvidado en la producción de cultivos por demasiado tiempo, pero su papel vital en la nutrición vegetal es cada vez más reconocido.

Agradecimientos

Parte de los resultados presentados en este artículo se obtuvieron en trabajo de investigación colaborativo con K+S Kali GmbH (Kassel, Alemania).

Bibliografía

- Cakmak, I., C. Hengeler, and H. Marschner. 1994a. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. *J. Exp. Bot.* 45:1245–1250.
- Cakmak, I., C. Hengeler, and H. Marschner. 1994b. 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. and E.A. Kirkby. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiol. Plant.* 133:692-704.
- Hermans, C., G.N. Johnson, R.J. Strasser, and N. Verbruggen. 2004. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta* 220:344–355.
- Silva, I.R., T.J. Smyth, D.W. Israel, C.D. Raper, and T.W. Ruffy. 2001. Magnesium is more efficient than calcium in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model. *Plant Cell Physiol.* 42:538-545.
- Yang, J.L., J.F. You, Y.Y. Li, P. Wu, and S.J. Zheng. 2007. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity. *Plant and Cell Physiol.* 48: 66–74. □