

Scientific Electronic Archives

Issue ID: Sci. Elec. Arch. Vol. 17 (4)

Jul/Ago 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/17420241898>

Article link: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/1898>



Dinâmica do magnésio no sistema solo-planta e sua participação no metabolismo e nutrição de plantas: uma revisão

Magnesium dynamics in the soil-plant system and its role in plant metabolism and nutrition: a review

Cintia da Silva Oliveira
Universidade Estadual de Goiás

Jaiara Almeida de Oliveira
Universidade Estadual de Goiás

Corresponding author
Valeska Cristina Souza Silva de Assis
Universidade Estadual de Goiás
valeskacristinalab@gmail.com

Gustavo Henrique de Oliveira
Universidade Estadual de Goiás

Amanda Aciely Serafim de Sá
Universidade Estadual de Goiás

Ramon Pereira da Silva
Universidade Estadual de Goiás

Maurício Tayar Casamassa
Universidade Estadual de Goiás

Mariana Pina da Silva Berti
Universidade Estadual de Goiás

Resumo. O magnésio é um nutriente essencial para as plantas, sendo necessário para a síntese de clorofila e o metabolismo da sacarose. Sua disponibilidade no solo pode ser afetada pela competição com outros cátions. A deficiência de magnésio causa clorose nas nervuras foliares e redução da clorofila. A absorção de magnésio pelas plantas é influenciada pela disponibilidade no solo e sua ligação com superfícies negativas. É importante garantir um suprimento adequado de magnésio para um crescimento saudável das plantas, pois ele desempenha um papel crucial na fotossíntese, metabolismo e síntese de proteínas. Diferentes culturas têm demandas variadas de magnésio, e a deficiência pode afetar o crescimento das raízes.

Palavras-chave: Macronutriente, nutrição de plantas, transportes, clorose, energia na planta.

Abstract. Magnesium is an essential nutrient for plants, being necessary for the synthesis of chlorophyll and sucrose metabolism. Its availability in the soil can be affected by competition with other cations. Magnesium deficiency causes chlorosis on the leaf veins and reduced chlorophyll. Magnesium uptake by plants is influenced by its availability in the soil and its binding to negative surfaces. It is important to ensure an adequate supply of magnesium for healthy plant growth, as it plays a crucial role in photosynthesis,

metabolism, and protein synthesis. Different crops have varying demands for magnesium, and deficiency can affect root growth.

Keywords: Macronutrient, plant nutrition, transport, chlorosis, energy in the plant.

Contextualização e análise

O magnésio é um nutriente essencial para as plantas, desempenhando diversas funções vitais (Muhlbachová et al., 2020). Sua disponibilidade é influenciada por fatores do solo, clima e práticas agrícolas (Chen et al., 2018). O magnésio é um importante cátion nas plantas, sendo crucial para seu desenvolvimento saudável (Gransee&Fuhrs 2013).

O magnésio desempenha um papel crucial nas funções intracelulares das plantas, atuando como cofator enzimático e regulando atividades metabólicas (Nezarat et al., 2018). Ele é essencial na formação da clorofila, responsável pela fotossíntese e pela coloração verde das plantas. Estudos também mostraram que a aplicação foliar de magnésio pode melhorar o teor de sacarose no caldo de cana, influenciando as enzimas envolvidas no metabolismo dessa substância (Jain et al., 2013).

O Mg no solo pode ser dividido em três frações principais: trocável, não trocável e mineral (Tian et al., 2021). A forma disponível do magnésio no solo é principalmente catiônica (Mg^{2+}), presente no complexo de troca de cátions e na solução do solo. A deficiência de magnésio pode ocorrer devido à competição com outros cátions, especialmente quando há manejo inadequado da calagem e adubação (Castro et al., 2021). A disponibilidade de magnésio para as plantas não é garantida apenas pelas altas concentrações solúveis de Mg^{2+} no solo devido à competição com outros cátions presentes. (Xie et al., 2021).

O Mg é absorvido pelas plantas como íon Mg^{2+} e desempenha funções vitais no metabolismo, como síntese de clorofila, captura de energia luminosa na fotossíntese e produção de carboidratos (Marschner, 2012). Em solos ácidos, altas concentrações de cátions como H^+ , Al^{3+} e Mn^{2+} , podem interferir na absorção de Mg^{2+} pelas raízes, resultando em deficiência de Mg (Kunhikrishnan et al., 2016).

De forma geral, a clorose entre as nervuras foliares é o sintoma mais comum de deficiência de magnésio nas plantas, no entanto, a clorose foliar causada pela baixa disponibilidade de magnésio pode variar em termos de localização nas folhas (Tian et al., 2021). Geralmente, a deficiência começa nas folhas mais antigas e se espalha para as folhas mais novas ao longo do tempo (Cakmak& Kirby, 2008; Farhat et al., 2014).

Esta revisão tem como objetivo abordar a dinâmica do elemento no sistema solo-planta, mecanismo de absorção, transporte e redistribuição, além da participação no metabolismo vegetal, marcha e absorção, exigência do elemento

nas principais culturas e os sintomas de deficiências e excessos nutricionais

Magnésio no sistema solo-planta

O magnésio (Mg) constitui aproximadamente 2% da composição da crosta terrestre e tem sua origem em minerais primários silicatados, como hornblenda, augita, olivina, talco, serpentina e biotita, entre outros. No entanto, a principal fonte de magnésio para o manejo da fertilidade do solo é a dolomita $-CaCO_3.MgCO_3$ (Raij, 2011).

Na crosta terrestre, o magnésio apresenta um teor médio de 219 g/kg. No entanto, devido ao processo de intemperismo que afeta os minerais ricos em magnésio, ocorre a lixiviação desse elemento. Isso resulta em um teor médio de magnésio no solo de aproximadamente 5 g/kg. Vale ressaltar que a concentração de magnésio no solo pode variar significativamente, oscilando entre 0,5 g/kg e 40 g/kg, entretanto, a maior parte dos solos apresentam teores de magnésio na faixa de 3-25 g/kg (Yan et al., 2018).

Os solos brasileiros, de forma geral, apresentam uma baixa concentração de magnésio (Mg). Essa condição se deve tanto ao material de origem, que possui naturalmente baixas concentrações desse nutriente, quanto a intensos processos pedogenéticos que ocorrem ao longo da formação dos solos, nos quais os produtos de intemperização, incluindo o Mg, são lixiviados. Além disso, o processo de acidificação do solo exerce uma influência negativa sobre o teor de Mg, devido à reduzida estabilidade dos carbonatos, sulfatos, silicatos e aluminossilicatos de Mg em ambientes ácidos (Castro et al., 2021).

De acordo com Tian et al., (2021), a absorção de magnésio (Mg) pelas plantas está diretamente relacionada à disponibilidade desse nutriente nos solos. Nos solos, o magnésio está presente em três principais frações: trocável, com teor total entre 5% e 10% (disponível para as plantas), não trocável e na forma de minerais primários.

Mesmo sendo amplamente encontrado na crosta terrestre, uma proporção significativa desse elemento é incorporada na estrutura cristalina dos minerais. (Senbayram et al., 2015), isso torna a absorção de magnésio pelas plantas relativamente difícil. Além disso, devido ao seu grande raio hidratado, o íon Mg^{2+} livre tem uma fraca ligação com a superfície negativamente carregada do solo e com as paredes das células das raízes, o que geralmente resulta na lixiviação do magnésio do solo (Gransee et al., 2013).

Em solos cultivados, especialmente em culturas altamente demandantes de potássio, como cafeeiros, algodoeiros, citros e bananeiras, que recebem altas doses de fertilizantes potássicos, é comum ocorrer a indução de deficiência de magnésio (Mg), principalmente em solos com baixa concentração desse nutriente. Além disso, o uso indiscriminado de calcário com baixo teor de magnésio (<5% de MgO) também pode resultar em problemas de deficiência nas plantas, uma vez que os fertilizantes convencionais não fornecem esse elemento. Portanto, é indicado que haja um equilíbrio adequado na relação entre Ca:Mg (Prado, 2020).

Estudos conduzidos por Munoz Hernandez & Silveira (1998) demonstraram que uma baixa relação de cálcio para magnésio (Ca:Mg) no solo, como 2:1 ou 3:1, resultou em um melhor crescimento do milho em comparação com uma relação alta, como 4:1 ou 5:1, indicando que houve uma quantidade relativamente maior de magnésio em relação ao cálcio no solo e, assim, concluindo que o milho teve melhor crescimento em solos com

uma baixa relação de Ca:Mg. Resultados como esses demonstram que, o equilíbrio adequado entre cálcio e magnésio no solo, é importante para promover o crescimento saudável do milho. A proporção correta desses elementos afeta a disponibilidade de nutrientes e a capacidade do solo de fornecer os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas. De acordo com Prado (2020), assim como outros nutrientes, o aumento do pH do solo para valores próximos a 6,5 proporciona uma maior disponibilidade de magnésio (Mg) no solo.

Sobre estudos direcionados ao magnésio no sistema solo-planta, é essencial compreender todos os compartimentos pelos quais esse nutriente transita, desde a solução do solo até as raízes e as partes aéreas das plantas, como demonstrado na Figura 1. Isso inclui sua incorporação em compostos orgânicos e seu papel como ativador enzimático. O magnésio desempenha funções vitais que possibilitam a máxima acumulação de matéria seca no produto agrícola final.

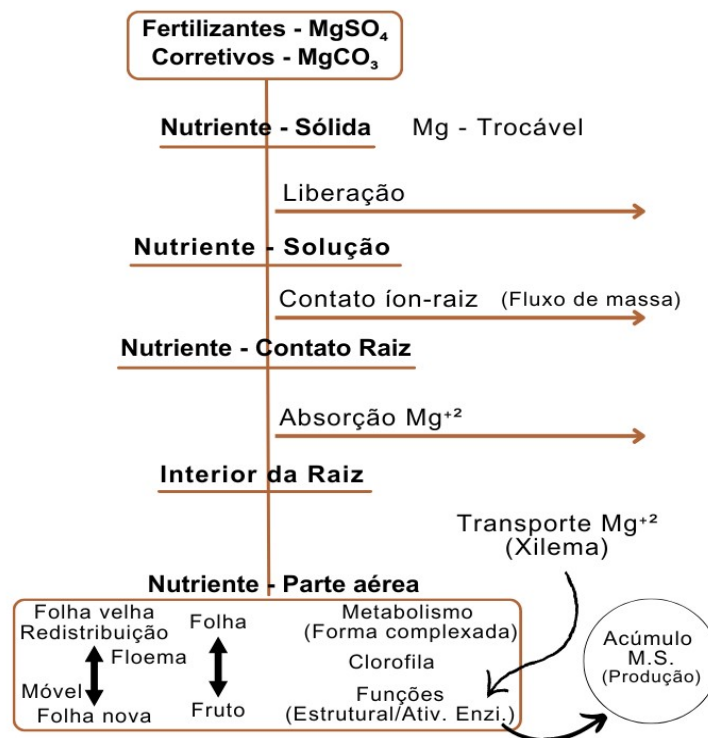


Figura 1. Dinâmica do magnésio (Mg) no sistema solo-planta: processos de transporte nos compartimentos da planta.

Fonte: Prado, 2020. Adaptado pelos autores.

Absorção, transporte e redistribuição

As plantas absorvem o magnésio na forma de íon Mg^{2+} e, nessa forma, o nutriente é transportado através do xilema para várias partes das plantas em desenvolvimento. Ele é incorporado pelas células, desempenhando funções vitais no metabolismo vegetal, como a atividade

fotossintética e a incorporação do Carbono (Marschner, 2012).

A obtenção de magnésio (Mg) pelas plantas a partir do solo é geralmente regulada por dois processos essenciais: o fluxo abundante, que envolve o movimento passivo do íon Mg^{2+} , sendo impulsionado pela corrente de transpiração, e a

difusão, que implica no deslocamento do íon Mg^{2+} de áreas de maior concentração para áreas de menor concentração, ou seja, a quantidade de Mg absorvida pelas plantas depende da sua concentração na solução do solo e da capacidade do solo em fornecer Mg através da reposição da solução do solo. As plantas desenvolvem estruturas de transporte altamente eficientes para a absorção de Mg, bem como a capacidade de armazenamento e movimentação, a fim de manter uma concentração mais elevada (geralmente em mM) em tecidos específicos (Chaudhry, 2021).

Após ser absorvido, o magnésio (Mg) é transportado até alcançar o xilema e, em seguida, de maneira passiva, é conduzido para a parte aérea da planta através da corrente transpiratória. O transporte do magnésio (Mg) do solo até as raízes ocorre principalmente através do fluxo de massa, responsável por cerca de 85% do total, esse movimento é dependente da dinâmica da água no sistema solo-planta, impulsionado pela transpiração das plantas. O processo de absorção do magnésio na forma de íons Mg^{2+} é extensivamente estudado, uma vez que altas concentrações de Ca^{2+} e, principalmente, de K^+ no meio podem inibir a sua absorção devido à competição iônica, resultando em deficiência de magnésio nas plantas (Prado, 2020).

O magnésio (Mg) é transportado principalmente para o interior das células, onde desempenha diversos processos biológicos. O acúmulo de íons Mg^{2+} é mais elevado no cloroplasto (0,5-2 mM) e na mitocôndria (2-4 mM), seguido pelo citosol (0,2-0,4 mM) (Ishijima et al., 2003; Gout et al., 2014; Igamberdiev et al., 2001). Consequentemente, são necessários transportadores de magnésio (Mg) para auxiliar no acúmulo de Mg nas áreas específicas das células. Além disso, o vacúolo desempenha um papel importante como um grande reservatório de Mg, contribuindo para a manutenção do equilíbrio citosólico desse mineral e, para promover a troca de Mg com o citosol, também são necessários transportadores específicos.

Ao contrário do Ca^{2+} , o Mg^{2+} possui mobilidade semelhante ao potássio K^+ no floema das plantas. Isso significa que o Mg pode se mover de uma parte da planta para outra através do floema, juntamente com a corrente de seiva elaborada. Essa mobilidade é essencialmente atribuída à presença de uma quantidade significativa de Mg na forma solúvel dentro da planta (Prado, 2020).

Uma parte importante do Mg nas plantas está presente na forma solúvel, ou seja, como íons Mg^{2+} dissolvidos na água dos tecidos vegetais. Essa solubilidade permite que o Mg seja facilmente transportado pelos tecidos condutores do floema, seguindo o fluxo da seiva elaborada que é transportada a partir das áreas de síntese e acumulação de compostos orgânicos, como folhas maduras, até as regiões de demanda metabólica

em outras partes da planta, como frutos em desenvolvimento, órgãos reprodutivos e tecidos em crescimento (Hermans et al., 2013).

A redistribuição do Mg nas plantas é crucial para garantir que as diferentes partes da planta tenham acesso adequado a esse nutriente vital. Ele desempenha papéis essenciais em várias atividades metabólicas, como a ativação de enzimas, a síntese de clorofila e a estabilidade de membranas celulares. Portanto, a mobilidade do Mg no floema permite uma redistribuição eficiente desse nutriente nas plantas, atendendo às demandas metabólicas específicas de diferentes tecidos e órgãos (Marschner, 2012).

Participação no metabolismo vegetal

O magnésio desempenha um papel crucial na fotossíntese, até 35% do magnésio nas células vegetais é preferencialmente direcionado para o cloroplasto (Tian et al., 2021). Além disso, as plantas estabelecem uma ordem de gradiente de magnésio (tilacoides > estroma > citosol) para garantir uma fotossíntese eficiente (Hermans et al., 2013; Chen et al., 2018; Farhat et al., 2016). Esses íons de magnésio presentes nos cloroplastos são conhecidos como componentes essenciais da clorofila, desempenhando um papel fundamental na captação de luz e atuando como cofatores em várias enzimas envolvidas na fotossíntese, eles estão diretamente envolvidos nos processos fotossintéticos (Shaul, 2002; Guo et al., 2016).

O íon Mg^{2+} é amplamente reconhecido por sua posição central na molécula de clorofila, desempenhando um papel crucial na estruturação organizada das lamelas do grana e do estroma (Xie et al., 2021). A deficiência grave de magnésio pode levar à clorose internerval das folhas mais antigas e completamente maduras devido aos complexos papéis desempenhados pelo magnésio na clorofila e na biossíntese de proteínas, o magnésio é altamente móvel dentro da planta, o que contribui para os sintomas observados (Marschner, 2012).

A proporção de magnésio ligado à clorofila em relação ao total varia de cerca de 6% a 25%, sendo mais elevada em plantas com deficiência de magnésio (Marschner, 2012). Isso indica que a síntese da clorofila não é limitada pelo magnésio ligado a ela em condições de deficiência, além disso, aproximadamente 5% a 10% do magnésio está firmemente ligado às pectinas da parede celular e a sais pouco solúveis no vacúolo, a porção restante do magnésio desempenha outras funções na fisiologia vegetal, algumas das quais também estão relacionadas à fotossíntese. Esses aspectos adicionais estão associados à carga elétrica e à alta capacidade de movimentação transmembranar do íon Mg^{2+} , refere-se ao processo pelo qual o íon Mg^{2+} atravessa a membrana celular, seja para entrar ou sair da célula (Gerendás e Fuhr, 2013).

O magnésio, juntamente com o potássio (K), desempenha um papel como cátion em processos fisiológicos semelhantes, como a

regulação do equilíbrio entre cátions e ânions e como um íon osmoticamente ativo na regulação do turgor das células (Marschner 2012). Além disso, assim como o potássio (K), o magnésio (Mg) contribui para a manutenção de um pH estável, o que é crucial para a atividade adequada de enzimas fotossintéticas, como a RuBP (ribulose-1,5-bisfosfato) (Woodrow e Berry 1988; Yuguan et al. 2009).

O magnésio (Mg) tem a capacidade de se ligar especificamente à molécula de RuBP (ribulose-1,5-bisfosfato) e, ao fazer isso, aumenta a atividade catalítica dessa enzima (Belknap&Portis 1986). O magnésio (Mg) desempenha um papel fundamental como ativador alostérico é uma substância que se liga a uma 300 enzima diferentes ou receptor em um local diferente do sítio ativo, promovendo uma alteração em sua estrutura que aumenta sua atividade (Verbruggene Hermans 2013; Senbayram et al. 2015).

Na síntese de proteínas, o magnésio (Mg) desempenha um papel vital ao ligar duas subunidades dos ribossomos, que são os locais onde ocorre a tradução das proteínas, permitindo que eles adotem sua forma ativa (SperrazaeSpremluli 1983). Mais um papel essencial que o magnésio (Mg) compartilha com o potássio (K) está relacionado à partição de carboidratos (Koch et al., 2020). O magnésio (Mg) desempenha um papel essencial no carregamento do floema com sacarose nas plantas, atuando como ativador alostérico das ATPases, promovendo a criação de um gradiente de prótons, esse gradiente é necessário para o transporte eficiente de sacarose e prótons através dos simportadores de sacarose/H⁺ no floema (Hermans et al., 2013).

Exigências nutricionais das culturas

Para um crescimento ideal, as plantas geralmente requerem uma concentração de 1,5 a 3,5 kg⁻¹ de magnésio por matéria seca, essa faixa de concentração de Mg é considerada adequada para atender às necessidades nutricionais das plantas e permitir um crescimento saudável (Marschner, 2012).

A cultura da cana-de-açúcar extraiu a maior quantidade de magnésio por área, com cerca de 52 kg há⁻¹, seguida pelo milho, que extraiu cerca de 48 kg há⁻¹, por outro lado, o trigo e o arroz apresentaram uma extração relativamente baixa de magnésio, com aproximadamente 9 kg há⁻¹ podendo ser observado na Tabela 1 (Prado, 2020).

No trabalho realizado por Oliveira et al., (2010), que utilizou diferentes variedades de cana-de-açúcar a seguinte ordem decrescente de extração foi: K > Ca > N > Mg > P, maioria das variedades, algumas apresentaram maior extração mais N do que Ca, com média de 87 kg há⁻¹ de Mg extraído pela cultura.

O feijoeiro é a cultura que mais exporta magnésio por meio dos grãos, sendo crucial monitorar e repor esse nutriente, as leguminosas tendem a exportar mais magnésio do que as gramíneas, embora as gramíneas sejam mais eficientes na utilização de magnésio por tonelada de grão produzido, diferentes cultivares podem ter habilidades variadas na absorção e utilização do magnésio, devido a fatores genéticos (Prado, 2020). Portanto, é importante considerar as características de cada cultivar ao aplicar magnésio para garantir um suprimento adequado desse nutriente.

Tabela 1- Exigência de magnésio das principais culturas (Malavolta et al., 1997)

Cultura	Parte da planta	Matéria seca Mg acumulada produzida		Mg requerido para produção de 1 t de grãos	
		t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		
Anuais					
		Parte da planta	Total		
		t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg t ⁻¹	
Algodoeiro	Reprodutiva (algodão/ caroço)	1,3	5	12,7	9,8
	Vegetativa (caule/ramo/folha)	1,7	7		
	Raiz	0,5	0,7		
Soja	Grãos (vagens)	3	6	26	8,7
	Caule/ramo/folha	6	20		
Feijão	Vagem	1	5	18,5	18,5
	Caule	0,4	1		
	Folhas	1,2	12		
	Raiz	0,1	0,5		
Milho	Grãos	6,4	10	48	7,5
	Restos culturais		38		
Arroz	Grãos	3	4	9	3
	Colmos	2	1		
	Folhas	2	2		
	Casca	1	1		
	Raiz	1	1		

Trigo	Grãos	3	6	9	3
	Palha	3.1	3		
Semiperene/perene					
Cana-de-açúcar	Colmos	100	35	52	0,5
	Folhas	25	15		
Cafeeiro	Grãos	2	3	33	16,5
	Tronco, ramo e folhas		30		

Fonte: Prado, 2020. Adaptado pelos autores.

Marcha de absorção

Ao estudar a marcha de absorção dos nutrientes, Flores (2021) explicita que, para cada espécie, variedade ou cultivar, há um tempo apropriado para atender a demanda de cada nutriente. A partir de tal informação, pode-se elevar a eficiência do manejo de nutrição, contribuindo para expressar o maior potencial genético da cultura em termos de produtividade.

O conhecimento sobre marcha de absorção de nutrientes desempenha um papel fundamental para determinar o momento e a quantidade adequada de cada nutriente a ser disponibilizado para as plantas. É de grande importância os estudos com esse direcionamento sobre quantidade necessária de nutrientes e o acúmulo de matéria seca durante as diferentes fases de

desenvolvimento das culturas, pois isso está diretamente relacionado à distribuição eficiente dos nutrientes em cada fase e às suas necessidades fisiológicas (Araújo, 2018).

É de extrema importância a determinação da absorção e do acúmulo de nutrientes ao longo das diversas fases de desenvolvimento das plantas, pois essa informação permite identificar os momentos cruciais em que os elementos são mais necessários para o crescimento da cultura, assim como a distribuição desses elementos nas diferentes estruturas da planta. Essa abordagem é essencial para um manejo adequado da fertilização, garantindo viabilidade econômica e evitando doses excessivas, resultando em um manejo mais econômico e ecologicamente sustentável (Silva et al., 2017).

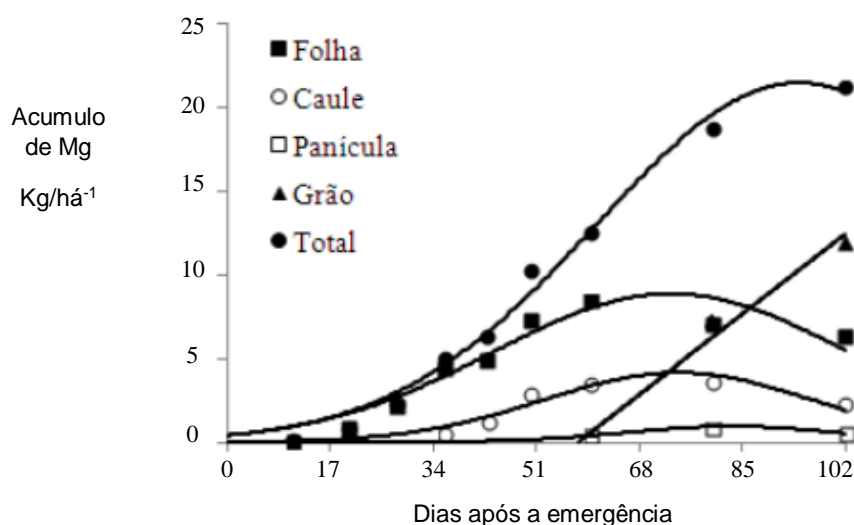


Figura 2. Marcha de absorção do Magnésio (Mg) no sorgo granífero.

Fonte: Borges et al., 2016.

Borges et al., (2016) elaboraram estudos sobre a absorção e acúmulo de Mg na cultura do sorgo (Figura 2), onde os resultados demonstraram que a planta de sorgo apresentou seu máximo de acúmulo aos 94 dias após a emergência (DAE) e seu ponto de inflexão (PI), que se trata do ponto em que a disponibilidade desse nutriente atinge um nível crítico em relação ao seu efeito no crescimento e desenvolvimento da planta, foi de 61 DAE. Deve-se salientar que a quantidade de Mg requerida pelo sorgo granífero foi de 21,52 kg há⁻¹.

Em relação à distribuição do Mg na planta, houve maior contribuição da folha para o desenvolvimento do grão, sendo uma contribuição perceptível, uma vez que a porcentagem de acúmulo aos 60 DAE foi de 68%, decrescendo para 31% aos 102 DAE, conforme ilustrado na Figura 3.

Estudos realizados por Silva et al., (2017) demonstraram que durante o ciclo de crescimento das plantas de amendoim, observou-se que as taxas de absorção de magnésio (Mg) foram consistentemente inferiores a cerca de 0,1 g dia⁻¹

até aproximadamente 110 DAE. No entanto, aos 120 DAE, houve um pico na absorção desse nutriente, alcançando um valor próximo a 0,90 g dia⁻¹. Após esse pico, a taxa de absorção de Mg diminuiu novamente e retornou aos valores próximos a 0,1 g dia⁻¹ apenas aos 160 DAE, no final do ciclo de crescimento das plantas de

amendoim. Esses padrões de absorção de Mg ao longo do tempo são importantes para entender as necessidades nutricionais específicas dessa cultura e para orientar estratégias de manejo adequadas para garantir um suprimento adequado de magnésio durante todo o ciclo de crescimento.

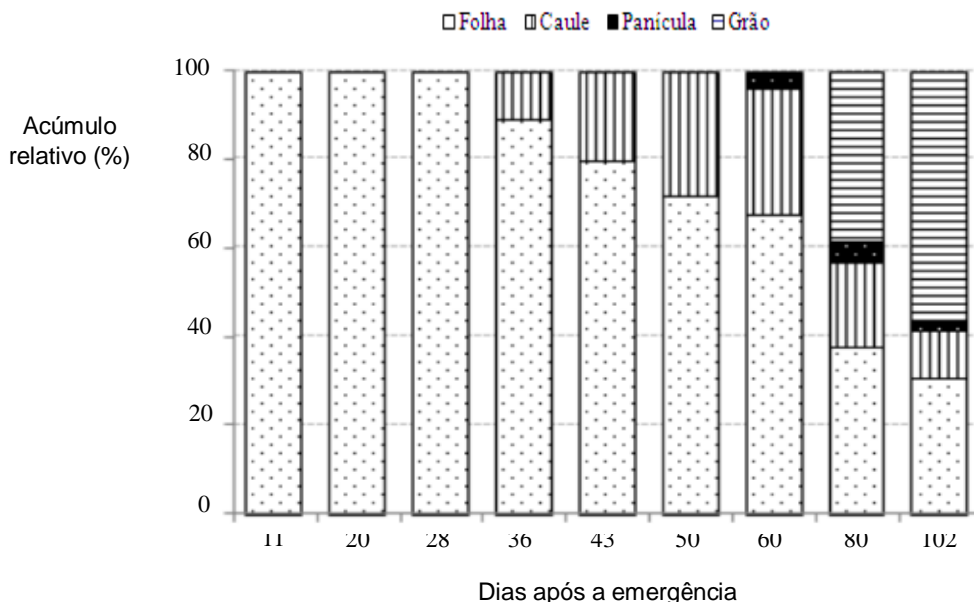


Figura 3. Acúmulo relativo do Magnésio (Mg) nas partes das plantas em função dos dias após a emergência (DAE) na cultura do sorgo granífero.

Fonte: Borges et al., 2016.

Sintomatologia de deficiências e excessos nutricionais

O magnésio desempenha diversas funções essenciais nas plantas, interagindo com ligantes nucleofílicos, é um componente vital da clorofila, junto com o nitrogênio, sendo os únicos nutrientes do solo envolvidos em sua composição, o magnésio também é fundamental na ativação enzimática, agindo como cofator em muitas enzimas fosforilativas, sua deficiência ocorre inicialmente nas folhas mais antigas devido à sua mobilidade nas plantas, os sintomas característicos incluem amarelecimento, bronzeamento e vermelhidão das folhas, enquanto as nervuras permanecem verdes (Pereira et al., 2020).

A deficiência de magnésio também leva a aumentos significativos na acumulação de carboidratos nos tecidos vegetais, afetando o metabolismo fotossintético do carbono e restringindo a fixação de CO₂ (Hermans et al., 2004). De acordo com um estudo adicional conduzido por Hermans et al. (2010), a deficiência de magnésio (Mg) nas plantas geralmente está associada ao desenvolvimento de raízes mais curtas, brotos menores e ao surgimento de manchas necróticas nas folhas. Esses sintomas são principalmente causados por processos fisiológicos anormais que afetam negativamente o metabolismo

do carbono, resultando em declínio na produção de clorofila e na capacidade de fixação de carbono.

Segundo os estudos realizados por Coelho et al., (2012), os sintomas da deficiência desse nutriente geralmente se manifestam inicialmente no limbo foliar das folhas mais antigas da planta, devido à alta mobilidade desse nutriente dentro da planta, sintomas esses que são descritos em experimentos elaborados por Taiz et al., (2017), onde a sintomatologia de deficiência de Mg nas plantas provoca sintomas como clorose entre as nervuras das folhas, afetando principalmente as folhas mais antigas devido à alta mobilidade desse cátion. Se a planta permanecer por um longo período sem receber a quantidade adequada desse nutriente, as folhas podem apresentar coloração branca ou amarelada. Além disso, outro sintoma possível é a senescência precoce e a queda prematura das folhas.

Assim, como relatado também em outro estudo de Hermans et al., (2005), em que a deficiência de magnésio (Mg) interrompe o processo de carregamento de sacarose no floema, o que leva ao acúmulo de carbono nas folhas de origem. No entanto, ao suprir a planta com magnésio, observa-se um aumento rápido na exportação de sacarose para o floema a partir dessas folhas.

A deficiência de magnésio nas plantas pode levar a sintomas como amarelamento das folhas (clorose), especialmente nas áreas mais velhas das plantas, e redução no crescimento geral. Para corrigir essa deficiência, geralmente é recomendada a aplicação de fertilizantes contendo magnésio, como os quelatos de magnésio. É importante seguir as orientações específicas para a aplicação correta do fertilizante e considerar a causa subjacente da deficiência de magnésio, como pH do solo inadequado ou excesso de outros nutrientes que podem afetar a absorção do magnésio pelas plantas (Barbosa et al., 2019).

No trabalho realizado por Junior et al., (2019), com plantas de alface, após 8 dias do transplante, sintomas de deficiência de magnésio foram observados nas plantas, incluindo clorose entre as nervuras das folhas mais antigas e pontos necróticos nas margens, aos 21 dias, os sintomas se intensificaram, com manchas amareladas evoluindo para uma coloração esbranquiçada nas folhas mais velhas e maior necrose nas margens, o sistema radicular teve um desenvolvimento limitado e as raízes apresentaram coloração escura.

A pesquisa sobre a deficiência de magnésio é mais comum do que de sua toxicidade. Os sintomas de toxicidade são difíceis de serem observados nas plantas, mesmo com altas concentrações de Mg^{2+} (Shaul et al. 1999). Isso pode ser devido à capacidade de armazenamento de Mg nas vacúolas das plantas (Hawkesford et al. 2012). No entanto, alguns estudos relatam sintomas de toxicidade, como manchas cor de cobre ao longo das nervuras marginais ou manchas necróticas nas folhas (Venkatesan e Jayaganesh 2010).

Conclusões

Em conclusão, o magnésio é um nutriente essencial para as plantas, desempenhando um papel fundamental em várias funções celulares, como a síntese de clorofila e o metabolismo da sacarose. Sua disponibilidade no solo pode ser afetada por fatores diversos, e a deficiência desse nutriente resulta em sintomas visíveis, como a redução da clorofila e a clorose nas nervuras foliares. É crucial garantir um suprimento adequado de magnésio, monitorando e repondo-o adequadamente no solo, a fim de promover o crescimento saudável das plantas. O magnésio é absorvido pelas plantas como íon Mg^{2+} , sendo transportado para diferentes partes da planta e desempenhando funções vitais na fotossíntese, metabolismo e síntese de proteínas. Portanto, seu monitoramento e reposição adequada são essenciais para otimizar a atividade fotossintética e garantir o desenvolvimento adequado das plantas.

Referências

Araújo, W. A. D. Acúmulo de matéria seca e marcha de absorção de nutrientes em soja de crescimento determinado e indeterminado. 2018.

Barbosa, R. P., Cairo, P. A. R., Lacerda, J. D. J., & Botelho, V. V. Os efeitos da deficiência de magnésio na partição de açúcares não restringem o crescimento de raízes em plantas jovens de eucalipto. *Ciência Florestal*, v. 29, p. 622-631, 2019.

Belknap, W. R., & Portis Jr, A. R. Activation and carbon dioxide exchange kinetics of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase: negative cooperativity with respect to magnesium. *Biochemistry*, v. 25, n. 8, p. 1864-1869, 1986.

Borges, ID, Franco, AAN, Kondo, MK, Martins, DC, Teixeira, EC, & Moreira, SG. Acúmulo de macronutrientes em sorgo granífero safrinha. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 15, n. 2, pág. 294-304, 2016.

Cakmak, I.; Kirkby, E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, Malden, v. 133, n. 4, p. 692-704, 2008.

Castro, C. D., Oliveira Junior, A., Oliveira, F. A., Firmano, R. F., Zancanaro, L., Klepker, D., Foloni, J. S. S., Brighenti, A. M. and Benites, V. M. Magnesium: management for the nutritional balance of soybean [Embrapa Soja. Document 438]. Londrina: Embrapa Soybean, 2021.

Chaudhry, A. H., Nayab, S., Hussain, S. B., Ali, M., & Pan, Z. Current understandings on magnesium deficiency and future outlooks for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 22, n. 4, p. 1819, 2021.

Chen, Z. C., Peng, W. T., Li, J., & Liao, H. Functional dissection and transport mechanism of magnesium in plants. In: *Seminars in cell & developmental biology*. Academic Press. p. 142-152, 2018.

Chen, H. B., & Fan, X. L. Effects of magnesium remobilization and allocation on banana plant growth. *Journal of Plant Nutrition*, v. 41, n. 10, p. 1312-1320, 2018.

Coelho, V. A. T. et al. Caracterização de sintomas visuais de deficiências de macronutrientes e boro em plantas de gengibre ornamental. *Revista Brasileira de Horticultura Ornamental*, v. 18, n. 1, p. 47, 2012.

Farhat, N., Rabhi, M., Krol, M., Barhoumi, Z., Ivanov, A. G., McCarthy, A., & Huner, N. P. Starch and sugar accumulation in *Sulla carnosa* leaves upon Mg^{2+} starvation. *Acta physiologiae plantarum*, v. 36, p. 2157-2165, 2014.

Farhat, N., Elkhouni, A., Zorrig, W., Smaoui, A., Abdelly, C., & Rabhi, M. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis and carbohydrate partitioning. *Acta physiologiae plantarum*, v. 38, n. 6, p. 145, 2016.

- Flores, R. A. Marcha de absorção define micronutrientes no tomateiro. *Jornal Campo & Negócios - Hortifruti*, Uberlândia, p. 23 - 26, 27 set. 2021.
- Gransee, A., & Fühns, H. Magnesium mobility in soils as a challenge for soil and plant analysis, magnesium fertilization and root uptake under adverse growth conditions. *Plant and Soil*, v. 368, p. 5-21, 2013.
- Gerendás, J., & Fuhns, H. The significance of magnesium for crop quality. *Plant and Soil*, v. 368, p. 101-128, 2013.
- Gout, Elisabeth et al. Interação de Mg²⁺, ADP e ATP no citosol e nas mitocôndrias: desvendando o papel do Mg²⁺ na respiração celular. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 43, pág. E4560-E4567, 2014.
- Gransee, A., Fuhns, H. A mobilidade do magnésio nos solos como um desafio para a análise do solo e da planta, fertilização com magnésio e absorção pelas raízes sob condições adversas de crescimento. *Plant Soil*. 368:5–21 p., 2013.
- Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, v. 4, n. 2, p. 83-91, 2016.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. Functions of macronutrients. In: Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press, 2012. p. 135-189.
- Hermans, C., Vuylsteke, M., Coppens, F., Cristescu, SM, Harren, FJ, Inzé, D., & Verbruggen, N. Análise de sistemas das respostas à deficiência e restauração de magnésio a longo prazo em *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*, v. 187, n. 1, pág. 132-144, 2010.
- Hermans, C., Conn, S. J., Chen, J., Xiao, Q., & Verbruggen, N. An update on magnesium homeostasis mechanisms in plants. *Metallomics*, v. 5, n. 9, p. 1170-1183, 2013.
- Hermans, C.; Verbruggen, N. Caracterização fisiológica da deficiência de Mg em *Arabidopsis thaliana*. *Journal of experimental botany*, v. 56, n. 418, pág. 2153-2161, 2005.
- Hermans, C., Johnson, C. N., Strasser, R. J., Verbruggen, N. Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. *Planta* v. 220, p. 344–355, 2004.
- Igamberdiev, Abir U.; Kleczkowski, Leszek A. Implicações do equilíbrio governado por adenilato quinase de adenilatos em conteúdo de magnésio livre em células vegetais e compartimentos. *Biochemical Journal*, v. 360, n. 1, pág. 225-231, 2001.
- Ishijima, S.; Uchibori, A.; Takagi, H.; Maki, R.; Ohnishi, M. Aumento induzido pela luz na concentração de Mg²⁺ livre em cloroplastos de espinafre: Medição de Mg²⁺ livre usando uma sonda fluorescente e necessidade de alcalinização estromal. *Arco. Bioquim. Biophys*, 412, 126-132, 2003.
- Jain, R., Chandra, A., & Solomon, S. Impact of exogenously applied enzymes effectors on sucrose metabolizing enzymes (SPS, SS and SAI) and sucrose content in sugarcane. *Sugar Tech*, v. 15, p. 370-378, 2013.
- Junior, F. D. A. G., da Silva Pereira, B. L., da Silva, M. G., & Soares, T. M. Sintomatologia de deficiência de macronutrientes em plantas de alface. *Informe econômico(UFPI)*, v. 38, n. 1, 2019.
- Koch, M., Naumann, M., Pawelzik, E., Gransee, A., & Thiel, H. The importance of nutrient management for potato production Part I: Plant nutrition and yield. *Potato research*, v. 63, p. 97-119, 2020.
- Kunhikrishnan, A., Thangarajan, R., Bolan, N. S., Xu, Y., Mandal, S., Gleeson, D. B., ... & Naidu, R. Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. *Advances in agronomy*, v. 139, p. 1-71, 2016.
- Marschner, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd. ed. London: Elsevier. 651 p., 2012.
- Muhlbachová, G., Cermák, Kás, M., Vavera, R., Pechová, M., & Marková, K. Boron content in soils under increasing magnesium and sulphur doses in a field experiment. *Plant, Soil and Environment*, v. 66, n. 7, p. 366-373, 2020.
- Munoz Hernandez, Roger Jesus; Silveira, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações Ca: Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (*Zea mays* L.). *Scientia Agricola*, v. 55, p. 79-85, 1998.
- Nezarat, S., Gholami, A., Asghari, H. R., & Baradaran Firouzabadi, M. Sweet Sorghum response to magnesium fertilization and top removal. *Sugar Tech*, v. 20, p. 305-311, 2018.
- Oliveira, E. C. A. D., Freire, F. J., Oliveira, R. I. D., Freire, M. B. G. D. S., Simões Neto, D. E., & Silva, S. A. M. D. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 1343-1352, 2010.
- Pereira, E. G., Saraiva, A. G., Dias, A. C., Ferreira, N. D. S., De Lima, B. R., Fernandes, E. D. C., & Fernandes, M. S. O metabolismo de nitrogênio em plantas de arroz é severamente afetado pela deficiência de cálcio e magnésio. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 3, p. 15351-15362, 2020.

- Prado, Renato de Mello. Nutrição de plantas / Renato de Mello Prado. 2^o.ed. – São Paulo: Editora Unesp. p., 201, 2020.
- Raij, B. van. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute. 420 p., 2011.
- Selvaraj, V., & Sankar, J. Characterisation of magnesium toxicity, its influence on amino acid synthesis pathway and biochemical parameters of tea. *Research Journal of Phytochemistry*, v. 4, n. 2, p. 67-77, 2010.
- Senbayram, M., Gransee, A., Wahle, V., & Thiel, H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. *Crop and Pasture Science*, v. 66, n. 12, p. 1219-1229, 2015.
- Shaul, O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *Biometals*, v. 15, p. 307-321, 2002.
- Shaul, O., Hilgemann, D. W., de-Almeida-Engler, J., Van Montagu, M., Inzé, D., & Galili, G. Cloning and characterization of a novel Mg²⁺/H⁺ exchanger. *The EMBO Journal*, v. 18, n. 14, p. 3973-3980, 1999.
- Silva, E. D. B., Ferreira, E. A., Pereira, G. A. M., Silva, D. V., & Oliveira, A. J. M. Peanut plant nutrient absorption and growth. *Revista caatinga*, v. 30, p. 653-661, 2017.
- Sperrazza, J. M., & Spremulli, L. L. Quantitation of cation binding to wheat germ ribosomes: Influences on submit association equilibria and ribosome activity. *Nucleic Acids Research*, v. 11, n. 9, p. 2665-2679, 1983.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy. *Fisiologia e Desenvolvimento vegetal*. 6^a ed, p.126-128, 2017.
- Tian, XY, He, DD, Bai, S., Zeng, WZ, Wang, Z., Wang, M., ... & Chen, ZC., *Avanços fisiológicos e moleculares na nutrição de plantas com magnésio*. *Planta e Solo*, v. 468, p. 1-17, 2021.
- Verbruggen, N., & Hermans, C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and soil*, v. 368, p. 87-99, 2013.
- Xie, K., Cakmak, I., Wang, S., Zhang, F., & Guo, S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. *The Crop Journal*, v. 9, n. 2, p. 249-256, 2021.
- Woodrow, I. E., & Berry, J. A. Enzymatic regulation of photosynthetic CO₂ fixation in C₃ plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 39, n. 1, p. 533-594, 1988.
- Yan, Bo; HOU, Ying. Efeito do magnésio do solo nas plantas: uma revisão. In: *Série de Conferências IOP: Terra e Ciências Ambientais*. Editora IOP. p. 022168, 2018.
- Yuguan, Z., Min, Z., Luyang, L., Zhe, J., Chao, L., Sitao, Y., ... & Fashui, H. Effects of cerium on key enzymes of carbon assimilation of spinach under magnesium deficiency. *Biological trace element research*, v. 131, p. 154-164, 2009.