1° edição

Alasse Oliveira da Silva
Alane Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva
Natanael Lucena Ferreira

Organizadores

TÓPICOS DE NUTRIÇÃO DE PLANTAS NA AGRICULTURA TROPICAL

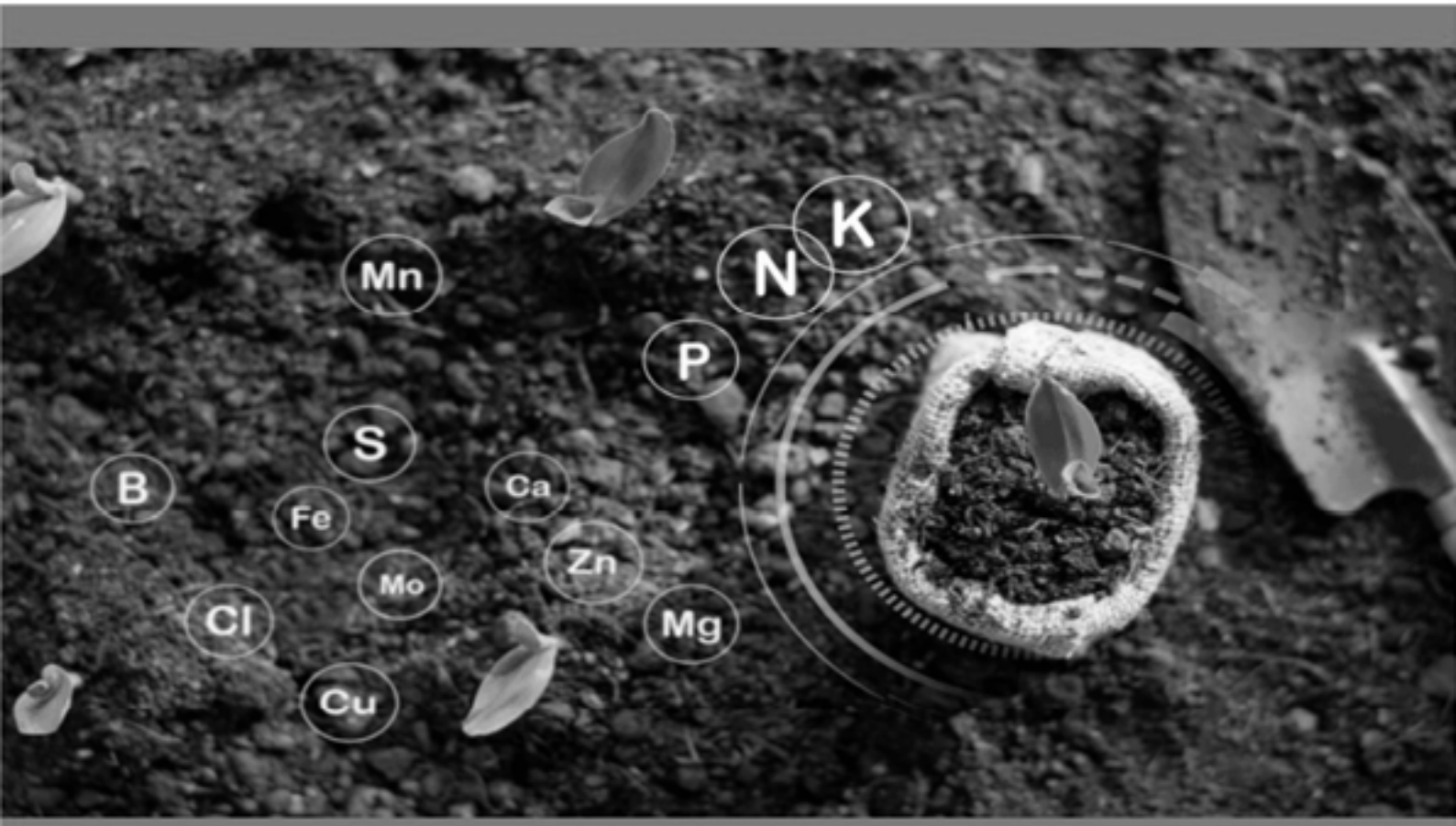
TERRIED

1° edição

Alasse Oliveira da Silva
Alane Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva
Natanael Lucena Ferreira

Organizadores

TÓPICOS DE NUTRIÇÃO DE PLANTAS NA AGRICULTURA TROPICAL



TERRIED

1.ª Edição - Copyrights do texto - Autores e Autoras
Direitos de Edição Reservados à Editora Terried
É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte.

O conteúdo dos capítulos apresentados nesta obra são de inteira responsabilidade d@s autor@s, não representando necessariamente a opinião da Editora.
Permitimos a reprodução parcial ou total desta obra, considerado que seja citada a fonte e a autoria, além de respeitar a Licença Creative Commons indicada.

Conselho Editorial

Adilson Cristiano Habowski - ***Currículo Lattes***

Adilson Tadeu Basquerote Silva - ***Currículo Lattes***

Alexandre Carvalho de Andrade - ***Currículo Lattes***

Alasse Oliveira da Silva - *Doutorando em Produção Vegetal (ESALQ/USP)*

Anísio Batista Pereira - ***Currículo Lattes***

Celso Gabatz - ***Currículo Lattes***

Cristiano Cunha Costa - ***Currículo Lattes***

Denise Santos Da Cruz - ***Currículo Lattes***

Emily Verônica Rosa da Silva Feijó - ***Currículo Lattes***

Fabiano Custódio de Oliveira - ***Currículo Lattes***

Fernanda Monteiro Barreto Camargo - ***Currículo Lattes***

Fredi dos Santos Bento - ***Currículo Lattes***

Guilherme Mendes Tomaz dos Santos - ***Currículo Lattes***

Humberto Costa - ***Currículo Lattes***

Leandro Antônio dos Santos - ***Currículo Lattes***

Lourenço Resende da Costa - ***Currículo Lattes***

Marcos Pereira dos Santos - ***Currículo Lattes***

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Tópicos de Nutrição de Plantas na Agricultura Tropical. Alasse Oliveira da Silva; Alane Oliveira da Silva; Jonathan Albuquerque Gomes; Diocléa Almeida Seabra Silva; Natanael Lucena Ferreira. (Organizadores) -- Alegrete, RS : Editora Terried, 2026.

PDF

ISBN. 978-65-83367-93-8

1. Agricultura

24-225451 CDD-918.17

Índices para catálogo sistemático:

1. Agricultura 90.14

2. Ensino 90.9

TERRIED

www.terried.com

contato@terried.com

APRESENTAÇÃO

A agricultura contemporânea enfrenta o desafio permanente de produzir mais alimentos, fibras e energia de forma eficiente, sustentável e ambientalmente responsável. Nesse contexto, a compreensão dos processos que regulam a fertilidade do solo, a dinâmica dos nutrientes e a nutrição mineral das plantas torna-se indispensável para a formação de profissionais qualificados e para o desenvolvimento de sistemas produtivos cada vez mais eficientes.

Esta obra foi concebida com o propósito de reunir conhecimentos científicos atualizados sobre os principais macronutrientes essenciais às plantas, abordando sua dinâmica no sistema solo-planta, seus mecanismos de absorção, suas funções fisiológicas e as estratégias de manejo que contribuem para maior eficiência no uso dos fertilizantes e dos recursos naturais.

Ao longo dos capítulos, o leitor encontrará uma abordagem fundamentada em literatura científica nacional e internacional, integrando conceitos de química, física, biologia do solo, fisiologia vegetal e manejo nutricional. A proposta não se limita à descrição dos nutrientes, mas busca compreender as interações existentes entre solo, planta, ambiente e microbiota, oferecendo uma visão integrada dos processos que determinam a produtividade agrícola.

Além dos aspectos relacionados aos macronutrientes, esta publicação contempla discussões sobre bioinsumos, atividade biológica do solo e tecnologias voltadas à melhoria da eficiência agronômica, refletindo as transformações que vêm ocorrendo na agricultura moderna e a crescente necessidade de sistemas produtivos mais sustentáveis.

Esperamos que este livro contribua para a formação de estudantes de graduação e pós-graduação, pesquisadores, professores, consultores e profissionais do setor agrícola, servindo como material de apoio para o ensino, a pesquisa e a tomada de decisão no campo.

A todos os autores que compartilharam seu conhecimento científico e colaboraram para a construção desta obra, registro meu sincero agradecimento. Que este trabalho represente uma contribuição efetiva para o fortalecimento da ciência agronômica e para o avanço da agricultura tropical.

Alasse Oliveira da Silva
Organizador

PREFÁCIO

A ciência da nutrição mineral de plantas evoluiu significativamente nas últimas décadas, impulsionada pelo avanço das pesquisas em fertilidade do solo, fisiologia vegetal, microbiologia agrícola e manejo sustentável dos sistemas produtivos. Ao mesmo tempo, os desafios enfrentados pela agricultura moderna tornaram ainda mais evidente a necessidade de compreender os processos que governam a disponibilidade e o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas.

Esta obra nasce com esse propósito: reunir informações científicas consistentes, atualizadas e organizadas de forma didática sobre os principais macronutrientes, integrando conhecimentos clássicos com os avanços mais recentes da pesquisa agronômica.

Cada capítulo foi elaborado a partir de ampla revisão bibliográfica, priorizando estudos científicos reconhecidos nacional e internacionalmente. O resultado é um material que busca explicar não apenas as funções dos nutrientes, mas também sua dinâmica no sistema solo-planta, suas interações com fatores físicos, químicos e biológicos, e as implicações práticas para o manejo agrícola.

Em um cenário de crescente demanda por eficiência no uso de fertilizantes, conservação dos recursos naturais e intensificação sustentável da produção, compreender esses processos torna-se essencial para pesquisadores, docentes, estudantes e profissionais que atuam diretamente na agricultura.

Espero que este livro estimule a reflexão científica, fortaleça a formação acadêmica e contribua para o desenvolvimento de soluções inovadoras para os desafios da agricultura tropical. Mais do que reunir capítulos independentes, esta obra procura oferecer uma visão integrada dos processos que sustentam a produtividade vegetal e a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Desejo ao leitor uma excelente leitura e que os conhecimentos aqui apresentados sirvam como fonte de consulta permanente, inspiração para novas pesquisas e apoio à construção de uma agricultura cada vez mais eficiente, responsável e baseada na ciência.

Alasse Oliveira da Silva
Organizador

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....9

NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA, CICLAGEM, FIXAÇÃO BIOLÓGICA E NUTRIÇÃO VEGETAL

Alane Oliveira da Silva; Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Wendel Vanderley Torres dos Santos; Gabriela de Alcantara Dalevedo; Vivian Soraia da Silva Santos; Thauana Milena da Silva; Lorrany Silva Moraes Amoras; Natanael Lucena Ferreira; Gabriel Da Silva Costa; João Vitor Furlan Segato; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Amanda Bernuci; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 2.....24

FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: FRAÇÕES FOSFATADAS, DISPONIBILIDADE NO SOLO E METABOLISMO VEGETAL

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Ariane Ono de Vasconcelos; Wendel Vanderley Torres dos Santos; Antonio Carlos Inforçato Rodrigues; Patrik Francisco de Almeida Marques; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; João Eduardo Pereira Cardoso; Vitória Marciele Melo da Silva; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Joab Freitas de Oliveira; Aline Nazaré Habib Guedes; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 3.....36

POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: FORMAS NO SOLO, TRANSPORTE DE FOTOASSIMILADOS E RELAÇÕES HÍDRICAS

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Daniele Soares Barroso; Vivian Soraia da Silva Santos; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; João Eduardo Pereira Cardoso; Gabrielle Siqueira de Souza; Elaidy Laura Oliveira Cardoso; Natanael Lucena Ferreira; Damiana Roberta dos Santos Alvelino; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Carlos Afonso Machado; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 4.....49

MAGNÉSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA NO SOLO, FOTOSSÍNTESE E METABOLISMO ENERGÉTICO VEGETAL

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Lorrany Silva Moraes Amoras; Saymo Justiniano da Silva; Natanael Lucena Ferreira; Lara Oliveira Prestes Lourenço; João Eduardo Pereira Cardoso; Daniele Soares Barroso; João Vitor Sousa Bruni; Felipe Soares Gonçalves; Kelly Kaoanny Pires de Oliveira; Carolina Lagazzi Dreger; Lívia Tálita da Silva Carvalho; Debora Menezes dos Santos; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 5.....59

ENXOFRE: SÍNTESE DE PROTEÍNAS, METABOLISMO, FONTES E MANEJO DA ADUBAÇÃO

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Karen Nascimento Campos; Alane Oliveira da Silva; Natanael Lucena Ferreira; Daiane Antonello Taetti; Ana Júlia Souza de Oliveira; Hanrara Pires de Oliveira; Carlos Giliard Lima; José Epitácio dos Santos Neto; Weslley Alves Gonçalves; Dioclea Almeida Seabra Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Alasse Oliveira da Silva

CAPÍTULO 6.....69
CÁLCIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA, CORREÇÃO DA ACIDEZ E FORMAÇÃO DOS TECIDOS VEGETAIS
Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; Dimas Luiz da Silva Cappovila; Natanael Lucena Ferreira; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Daniele Soares Barroso; Damiana Roberta dos Santos Alvelino; Andrey de Souza Ferazin; Lívia Tálita da Silva Carvalho; Emanuel Moraes de Souza; Dioclea Almeida Seabra Silva; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes

CAPÍTULO 7.....80
USO E MANEJO CORRETO DE FERTILIZANTES MODERNOS: FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA, TECNOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO
Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; João Gustavo Ferreira Casseb; Aline Nazaré Habib Guedes; Vivyan Justi Conceição; Tiago dos Santos Cabral; Julia Clara Martim; Miryan de Souza Militão; Jaqueline da silva lima; Ana Clara Souza de Oliveira; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 8.....92
TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE NUTRIÇÃO FOLIAR NA AGRICULTURA: PRINCÍPIOS, FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA E BOAS PRÁTICAS DE APLICAÇÃO
Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Iego Sampaio de Sousa; Maila Pereira de Almeida; João Gustavo Ferreira Casseb; Jéssica Mayla Reis Serra; Natanael Lucena Ferreira; Layse Barreto de Almeida Abreu; Marcos Fernandes dos Santos Farias; Tamiris Alves dos Santos; Pétrik Alves Cavalcante; Igor André da Costa; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 9.....102
PANORAMA DOS MACRONUTRIENTES APLICADOS NA AGRICULTURA: FUNÇÕES, DINÂMICA NO SISTEMA SOLO-PLANTA E IMPORTÂNCIA AGRONÔMICA
Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; Francielli Biazi; Jéssica Mayla Reis Serra; Walleska Silva Torsian; Luciano Braga Leopoldino; Layse Barreto de Almeida Abreu; Felipe Gabriel Ferreira; Tamiris Alves dos Santos; Pamela Estefane de Souza Santos; Igor André da Costa; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

CAPÍTULO 10.....113
INTERAÇÃO BIOLÓGICA DO SOLO E DOS MACRONUTRIENTES: MICROBIOTA DO SOLO, CICLAGEM DE NUTRIENTES E BIOINSUMOS
Cydia Larissa Teles de Oliveira; Welica Zaiana Bastos Rocha; Luciano Braga Leopoldino; Layse Barreto de Almeida Abreu; Iego Sampaio de Sousa; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; Francielli Biazi; Jéssica Mayla Reis Serra; Marcos Fernandes dos Santos Farias; Derik Murilo da Silva; Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alasse Oliveira da Silva

CAPÍTULO 1

NITROGÊNIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA, CICLAGEM, FIXAÇÃO BIOLÓGICA E NUTRIÇÃO VEGETAL

Alane Oliveira da Silva; Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Wendel Vanderley Torres dos Santos; Gabriela de Alcantara Dalevedo; Vivian Soraia da Silva Santos; Thauana Milena da Silva; Lorrany Silva Moraes Amoras; Natanael Lucena Ferreira; Gabriel Da Silva Costa; João Vitor Furlan Segato; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Amanda Bernuci; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: O nitrogênio (N) regula processos centrais da produção agrícola, pois integra aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofila e enzimas associadas ao metabolismo vegetal. Apesar de sua abundância na atmosfera, a maior parte do N ocorre como dinitrogênio gasoso (N_2), forma não assimilada diretamente pela maioria das plantas cultivadas. No solo, o nutriente passa por mineralização, imobilização, nitrificação, desnitrificação, volatilização, lixiviação, absorção radicular e incorporação à matéria orgânica. Esses processos dependem de clima, textura, pH, palhada, matéria orgânica, atividade microbiana, raiz e manejo da adubação. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre a dinâmica do N no solo, a ciclagem em agroecossistemas, a fixação biológica de nitrogênio e a nutrição nitrogenada das plantas. A análise mostra que a eficiência agronômica do N não depende apenas da dose aplicada, mas da sincronização entre oferta, transformação no solo, demanda da cultura e capacidade fisiológica de absorção e assimilação. O manejo mais consistente integra fonte, época, local de aplicação, água, cobertura vegetal, correção do solo, inoculação e genótipo. Essa abordagem reduz perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação, com maior aproveitamento do N aplicado ou biologicamente fixado.

Palavras-chave: adubação nitrogenada; nitrificação; volatilização de amônia; fixação biológica de nitrogênio; eficiência de uso do nitrogênio.

INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) conecta produtividade vegetal, fertilidade do solo, atividade microbiana e impacto ambiental. O nutriente compõe aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, clorofila e coenzimas, o que explica sua relação com expansão

foliar, fotossíntese, formação de biomassa e rendimento. A resposta produtiva ao N, porém, não depende apenas da dose aplicada; ela resulta da interação entre fonte, solo, clima, sistema radicular, forma química absorvida e sincronia entre disponibilidade e demanda da cultura (Vieira, 2017).

A maior reserva de N está na atmosfera, sob forma de dinitrogênio gasoso (N_2), molécula que a maioria das plantas cultivadas não assimila diretamente. Para entrar no sistema solo-planta, o N precisa ser convertido por fixação biológica, deposição atmosférica ou síntese industrial de amônia. Após essa entrada, o nutriente passa por mineralização, imobilização, nitrificação, desnitrificação, volatilização, lixiviação, absorção radicular e incorporação à matéria orgânica. Portanto, o ciclo do N funciona como rede de transformações químicas e microbiológicas reguladas pelo ambiente edáfico (Vieira, 2017; Cassim et al., 2024).

Em solos tropicais, temperatura elevada, chuvas concentradas, acidez, textura, palhada e matéria orgânica alteram a velocidade dessas transformações. O teor total de N no solo, isoladamente, informa pouco sobre o suprimento no período crítico da cultura. A resposta agronômica depende da presença de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) no momento em que a planta apresenta demanda e raiz funcional para absorção (Gianello; Tedesco, 2000; Weber; Mielniczuk, 2009).

O uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos sustentou ganhos de produtividade, mas também ampliou perdas por volatilização de amônia (NH_3), lixiviação de NO_3^-, emissão de óxido nitroso (N_2O), acidificação do solo e eutrofização de corpos d'água. Assim, o manejo do N deixou de ser apenas decisão sobre dose e passou a exigir controle da forma, época, local de aplicação, água, palhada, raiz e atividade biológica (Vieira, 2017; Cassim et al., 2024).

A fixação biológica de nitrogênio (FBN) representa via biológica de entrada de N reativo nos agroecossistemas. Em leguminosas, a simbiose com rizóbios permite formação de nódulos e redução do N_2 pela nitrogenase. Em gramíneas, bactérias diazotróficas podem estimular crescimento e aproveitamento do N, mas a resposta deve ser interpretada com cautela, pois pode decorrer de mecanismos distintos da fixação direta de N_2 (Döbereiner, 1990; Hungria et al., 2010; Alcântara et al., 2018).

Este capítulo discute a dinâmica do N no sistema solo-planta, com foco em solos tropicais e sistemas agrícolas brasileiros. O texto aborda transformações

do N no solo, ciclagem em agroecossistemas, FBN e nutrição nitrogenada das plantas. A hipótese interpretativa é que a eficiência agronômica e ambiental do N depende da coordenação entre processos biológicos, químicos, físicos e fisiológicos, e não apenas da dose do fertilizante.

DESENVOLVIMENTO

Dinâmica do nitrogênio no solo

O N do solo ocorre em formas orgânicas e minerais. A fração orgânica predomina e está associada à matéria orgânica, aos resíduos vegetais, à biomassa microbiana, aos compostos húmicos, aos aminoaçúcares, às proteínas e aos ácidos nucleicos. Essa fração constitui a reserva de N do solo, mas não representa disponibilidade imediata para as plantas. A passagem do N orgânico para formas minerais depende da atividade microbiana e das condições físicas e químicas do ambiente edáfico (Vieira, 2017; Cassim et al., 2024).

As formas minerais de maior interesse agronômico são NH_4^+ e NO_3^-. O NH_4^+ possui carga positiva e pode ser retido no complexo de troca catiônica, absorvido pelas raízes, incorporado à biomassa microbiana, fixado em minerais 2:1 ou oxidado a NO_3^-. O NO_3^- possui carga negativa e apresenta baixa retenção na maioria dos solos tropicais, o que aumenta sua mobilidade no perfil e seu risco de perda por lixiviação. Essa diferença físico-química explica por que fontes amoniacais, ureia e formas nítricas têm comportamento distinto no solo (Cassim et al., 2024).

A distinção entre estoque total e disponibilidade imediata é essencial para interpretar o manejo do N. Um solo com teor elevado de matéria orgânica pode não liberar N mineral no período de maior demanda da cultura. Da mesma forma, um solo com teor menor de N total pode fornecer N mineral em momento adequado se a mineralização coincidir com a absorção radicular. Gianello e Tedesco (2000) avaliaram métodos químicos para estimar disponibilidade de N no solo e mostram a dificuldade de prever, por método único, a quantidade de N mineralizada durante o ciclo da cultura. Weber e Mielniczuk (2009), em experimento de longa duração, reforçaram que estoque e disponibilidade precisam ser analisados em conjunto, com atenção ao histórico de manejo.

A mineralização converte N orgânico em formas minerais, com formação inicial de NH_4^+. Microrganismos heterotróficos degradam resíduos vegetais, compostos orgânicos e biomassa microbiana morta, com liberação de N mineral. Esse processo fornece parte do N absorvido por culturas em sistemas com matéria orgânica ativa, resíduos culturais e palhada. Sua intensidade depende de temperatura, umidade, aeração, pH, textura e qualidade do resíduo. Resíduos com baixa relação C/N tendem a liberar N em menor tempo. Resíduos com alta relação C/N podem retardar a disponibilidade do nutriente, pois os microrganismos precisam capturar N mineral do solo para decompor material rico em carbono.

Em solos tropicais, a temperatura favorece atividade microbiana, mas a mineralização pode ser limitada por deficiência hídrica, acidez, compactação ou baixa qualidade dos resíduos. Fioreze et al. (2012) demonstraram que a liberação de N após adição de adubos orgânicos depende da textura do solo. Solos arenosos e argilosos diferem em retenção de água, proteção da matéria orgânica, atividade microbiana e permanência de formas minerais. Esse resultado confirma a necessidade de ajustar manejo nitrogenado ao tipo de solo.

A imobilização ocorre quando microrganismos incorporam NH_4^+ e NO_3^- à biomassa durante a decomposição de resíduos orgânicos. O processo é temporário, mas pode reduzir a disponibilidade de N para as plantas nos estádios iniciais de crescimento. Resíduos com alta relação C/N estimulam imobilização. Gramíneas com palha lignificada, restos culturais pobres em N e materiais com alta proporção de carbono aumentam a demanda microbiana por N mineral. Nessa situação, os microrganismos competem com a cultura pelo nutriente disponível na solução do solo.

Vargas et al. (2005) avaliaram imobilização de N em solo cultivado com milho sob plantio direto e preparo convencional. Cabezas et al. (2007) estudaram imobilização do N da ureia e do sulfato de amônio aplicados em pré-semeadura ou cobertura na cultura do milho em plantio direto. Esses estudos mostram que a posição da palha, a época de aplicação e a fonte de N alteram a fração do nutriente que permanece temporariamente na biomassa microbiana. Em cultura exigente no início do ciclo, essa retenção pode limitar crescimento inicial e área foliar. Em sistema com liberação gradual, a imobilização também pode proteger parte do N contra perdas imediatas.

A nitrificação é a oxidação biológica do NH_4^+ a NO_2^- e, depois, a NO_3^-. O processo ocorre por microrganismos nitrificantes e depende de oxigênio, NH_4^+ disponível, umidade adequada, temperatura favorável e pH menos restritivo. A formação de NO_3^- tem efeito agronômico ambíguo. Por um lado, o NO_3^- é forma absorvida por raízes e pode se mover por fluxo de massa até a zona radicular. Por outro lado, sua baixa retenção nos coloides aumenta o risco de lixiviação. Além disso, a nitrificação libera prótons, o que contribui para acidificação do solo quando fontes amoniacais ou ureia são usadas com frequência.

Rosolem et al. (2003) estudaram a dinâmica do N sob calagem e adubação nitrogenada em plantio direto, com palha na superfície. Esse contexto é necessário porque a calagem superficial altera o pH da camada superior, enquanto a palha modifica umidade, temperatura e atividade microbiana. Siqueira Neto et al. (2010) conectaram mineralização e desnitrificação sob plantio direto, com ênfase no papel da rotação de culturas. Rodrigues et al. (2026) acrescentaram evidências sobre NH_4^+, NO_3^-, mineralização e nitrificação em solos tropicais amazônicos sob soja, em plantio direto e preparo convencional. A leitura conjunta desses trabalhos mostra que a dinâmica do N muda conforme manejo, solo e condição climática.

A volatilização de NH_3 é uma das perdas de N mais expressivas quando ureia é aplicada na superfície. Após aplicação, a urease hidrolisa a ureia, com formação de carbonato de amônio e elevação temporária do pH ao redor do grânulo. Esse aumento de pH desloca o equilíbrio NH_4^+/NH_3 para a forma gasosa, que pode ser perdida para a atmosfera. A perda por volatilização aumenta com temperatura elevada, ausência de chuva após aplicação, umidade superficial, pH alto, presença de palha e aplicação superficial sem incorporação.

Viero et al. (2014) avaliaram volatilização de NH_3 a partir de fertilizantes nitrogenados em trigo e milho sob plantio direto no Sul do Brasil. Viero et al. (2017) estudaram inibidor de urease e manejo da irrigação para mitigar volatilização de amônia da ureia em milho sob plantio direto. Barberena et al. (2019) avaliaram uso de inibidores de urease em solos amazônicos. Soares et al. (2023) analisaram a dinâmica da volatilização de amônia a partir de ureia tratada com NBPT sob pH contrastante. Em conjunto, esses estudos mostram que a volatilização depende de fonte, pH, água, palha, temperatura e tecnologia de estabilização.

A lixiviação de NO_3^- ocorre quando o nitrato acompanha o fluxo descendente da água no perfil. Esse processo reduz a recuperação do N pela cultura e pode contaminar águas subterrâneas. O risco aumenta em solos arenosos, chuvas intensas, irrigação mal ajustada, aplicação antecipada e baixa demanda radicular. A lixiviação mostra que o manejo do N depende da arquitetura radicular. Culturas com raízes profundas recuperam parte do NO_3^- deslocado. Solos com compactação, acidez subsuperficial ou alumínio tóxico restringem enraizamento e aumentam perda.

Corrêa et al. (2007) avaliaram correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de corretivos e resíduos, com análise da mobilidade de nitrato, cálcio e magnésio. O trabalho reforça que a dinâmica do NO_3^- não depende apenas da adubação nitrogenada; ela também responde ao manejo da acidez e ao deslocamento de íons no perfil. O parcelamento da adubação reduz acúmulo de NO_3^- antes do pico de absorção. A cobertura vegetal também ajuda a capturar N mineral entre culturas comerciais.

Ciclagem do nitrogênio em agroecossistemas

A ciclagem do N em agroecossistemas envolve entradas, transformações, armazenamento temporário, absorção pelas plantas, exportação e perdas. As entradas ocorrem por adubação mineral, FBN, resíduos orgânicos, esterco, deposição atmosférica e reciclagem de biomassa. As saídas ocorrem por colheita, volatilização, lixiviação, desnitrificação, erosão e escoamento superficial. Vieira (2017) organiza o ciclo do N em sistemas agrícolas com ênfase nas rotas microbianas, nas perdas e nas medidas de mitigação. Essa abordagem mostra que a ciclagem não é apenas reposição de nutriente. Ela depende de processos biológicos que podem conservar ou perder N conforme o manejo.

A exportação pela colheita retira N do sistema. Em grãos, parte expressiva do N absorvido é remobilizada para sementes. Em forrageiras, a exportação depende do pastejo, corte e retorno por dejetos. Em sistemas integrados, parte do N consumido retorna ao solo, mas com distribuição irregular. A ciclagem eficiente exige que a entrada de resíduos, a decomposição e a absorção radicular ocorram em sequência compatível com a demanda da cultura.

Resíduos culturais representam fonte de carbono e N para microrganismos. A decomposição desses resíduos controla parte da mineralização e da imobilização. A relação C/N, o teor de lignina, o grau de fragmentação e a posição no solo afetam a velocidade de liberação do nutriente. No plantio direto, a palhada permanece sobre a superfície. Essa condição protege o solo, reduz erosão e conserva umidade, mas também altera a dinâmica da ureia, da mineralização e da atividade microbiana. Palha rica em carbono pode imobilizar N no início do ciclo da cultura seguinte.

Aita et al. (2004) avaliaram a dinâmica do N durante o ciclo do milho em sucessão à aveia preta e à ervilhaca comum. Silva et al. (2008) estudaram o aproveitamento do N da palha de milho e de adubos verdes pela cultura do milho. Esses trabalhos mostram que a espécie de cobertura altera o tempo de liberação do N e a recuperação pela cultura subsequente. Leguminosas adicionam N via FBN e liberam o nutriente com maior rapidez. Gramíneas produzem palha mais persistente e podem reduzir a disponibilidade inicial de N. A associação entre espécies pode equilibrar proteção do solo e fornecimento do nutriente, desde que o manejo respeite o ciclo da cultura comercial.

A matéria orgânica é a reserva dominante de N no solo. Sua manutenção depende de entrada de resíduos, proteção física, agregação, atividade microbiana e menor revolvimento. Sistemas com rotação, cobertura e plantio direto tendem a aumentar a estabilidade da matéria orgânica ao longo do tempo. O estoque de N, entretanto, não deve ser confundido com disponibilidade imediata. Parte do N orgânico permanece protegida em agregados ou associada a minerais, com liberação lenta. Outra parte está em frações mais lábeis, com maior relação com mineralização de curto prazo.

Weber e Mielniczuk (2009) estudaram estoque e disponibilidade de N em experimento de longa duração. Estudos desse tipo são necessários porque a dinâmica do nutriente reflete histórico de manejo, não apenas a safra avaliada. A matéria orgânica responde lentamente à adoção de práticas conservacionistas. Por isso, os efeitos do manejo do N precisam ser avaliados em escala temporal compatível com a alteração dos estoques orgânicos.

A textura interfere na ciclagem do N. Solos argilosos tendem a proteger matéria orgânica, reter mais água e apresentar maior capacidade de troca catiôni-

ca. Solos arenosos possuem menor retenção de água, menor proteção física da matéria orgânica e maior risco de lixiviação de NO_3^-. Fioreze et al. (2012) mostraram que a textura altera a dinâmica de liberação do N após adubação orgânica. Em solos argilosos, a mineralização pode ocorrer de forma mais gradual. Em solos arenosos, a liberação rápida seguida de chuva pode gerar perda. Por isso, dose, parcelamento e época de aplicação devem ser definidos com base no solo.

A eficiência da ciclagem depende da sincronia entre liberação de N e demanda da planta. Quando a liberação ocorre antes do crescimento radicular ou antes do período de absorção, aumentam perdas. Quando ocorre tarde, a cultura pode sofrer deficiência e perder potencial produtivo. Silva et al. (2006) estudaram manejo de N no milho sob plantio direto com plantas de cobertura e ureia marcada com ^{15}N, o que permite separar parte do N oriundo do fertilizante e parte do N oriundo do sistema. Silva et al. (2005) também avaliaram épocas e formas de aplicação de N no milho sob plantio direto, com implicações para imobilização, mineralização e recuperação do fertilizante.

A ciclagem eficiente não significa ausência de fertilizante. Significa menor dependência de dose corretiva e maior aproveitamento de N gerado no próprio sistema. Sistemas com solo coberto, raiz ativa e matéria orgânica protegida reduzem o intervalo em que N mineral fica exposto à perda. Essa lógica aproxima manejo de fertilidade, conservação do solo e eficiência de uso do nutriente.

Fixação biológica de nitrogênio

A FBN converte N_2 atmosférico em amônia por ação da enzima nitrogenase. Essa enzima exige energia e é sensível ao oxigênio. Nas leguminosas, a fixação ocorre em nódulos radiculares, nos quais a planta fornece carbono e a bactéria fornece N reduzido. Alcântara et al. (2018) definem a FBN como processo conduzido por bactérias diazotróficas capazes de transformar N atmosférico em formas assimiláveis pelas plantas. Essa definição é necessária porque separa FBN de simples promoção de crescimento. Nem toda bactéria promotora de crescimento fixa N em quantidade suficiente para alterar a nutrição da cultura.

A FBN representa entrada biológica de N no agroecossistema. Seu valor está na redução da dependência de fertilizantes nitrogenados industriais, no menor custo energético e no potencial de menor impacto ambiental. Porém, a

eficiência depende de condições químicas, biológicas e operacionais. A presença do microrganismo não garante fixação elevada. O processo exige compatibilidade entre planta e bactéria, atividade da nitrogenase, ambiente radicular adequado e suprimento de nutrientes ligados ao metabolismo da simbiose.

Leguminosas formam simbiose com rizóbios. O processo começa pelo reconhecimento molecular entre planta e bactéria, segue com infecção, formação de nódulos, diferenciação bacteriana e atividade da nitrogenase. O nódulo regula oxigênio e permite funcionamento do sistema enzimático. A soja brasileira é exemplo de sucesso da FBN em escala agrícola. O avanço ocorreu por seleção de estirpes, adaptação a solos tropicais, melhoramento vegetal e manejo de inoculação. Döbereiner (1990) discutiu avanços da pesquisa brasileira em FBN, com destaque para culturas tropicais e microrganismos associados. Embrapa (2024) revisa a trajetória da FBN no Brasil e registra a contribuição dos estudos com Azospirillum e gramíneas iniciados no país a partir da década de 1970.

No feijoeiro e em outras leguminosas, a resposta pode ser mais instável. A eficiência depende de estirpe, cultivar, temperatura, acidez, fósforo, molibdênio, cobalto, umidade e competição com rizóbios nativos. A presença de nódulos não garante fixação eficiente. É necessário avaliar massa, atividade e distribuição dos nódulos, além da resposta da planta. O manejo da FBN exige interpretação conjunta de planta, microrganismo e solo.

A acidez do solo reduz sobrevivência de rizóbios, crescimento radicular e nodulação. A deficiência de fósforo limita energia disponível para fixação, pois o processo exige ATP. Molibdênio participa da nitrogenase. Cobalto está ligado ao metabolismo bacteriano e à formação de compostos necessários à simbiose. O excesso de N mineral pode reduzir nodulação. Quando a planta dispõe de N facilmente absorvível, ela reduz investimento energético na simbiose. Por isso, altas doses de N em leguminosas podem prejudicar FBN. O manejo precisa equilibrar suprimento inicial e estímulo à nodulação (Alcântara et al., 2018; Embrapa, 2024).

A qualidade do inoculante também é decisiva. Produto vencido, exposto ao calor, armazenado de forma inadequada ou incompatível com tratamento químico de sementes pode falhar. Alcântara et al. (2018) orientam cuidados

com inoculação, proteção contra sol, uso no período recomendado e atenção ao tratamento de sementes. A inoculação é tecnologia biológica, não produto inerte. Sua eficiência depende de produto, dose, viabilidade, veículo, armazenamento, distribuição na semente e semeadura dentro do período recomendado.

Gramíneas não formam nódulos clássicos, mas podem se associar a bactérias diazotróficas rizosféricas, epifíticas ou endofíticas. Gêneros como *Azospirillum, Herbaspirillum* e *Gluconacetobacter* aparecem em estudos sobre culturas tropicais. A resposta em gramíneas pode resultar de fixação de N_2, produção de fitormônios, estímulo radicular ou melhor aproveitamento do fertilizante. Essa distinção é fundamental. Quando uma bactéria aumenta raiz e absorção, a produtividade pode subir sem que o N fixado represente parcela majoritária do N total da planta.

Hungria et al. (2010) demonstraram que a inoculação com estirpes selecionadas de *Azospirillum brasilense* e *A. lipoferum* melhorou rendimento de milho e trigo no Brasil. Dartora et al. (2013) avaliaram adubação nitrogenada associada à inoculação com *A. brasilense* e *Herbaspirillum seropedicae* em milho. Quadros et al. (2014) estudaram desempenho de híbridos de milho inoculados com *Azospirillum brasilense*. Breda et al. (2016) analisaram produtividade de milho na presença de doses de N e inoculação de *Herbaspirillum seropedicae*. Esses trabalhos mostram que a resposta de gramíneas à inoculação é promissora, mas depende de dose de N, estirpe, híbrido, solo e clima.

Nutrição nitrogenada das plantas

O N participa de moléculas estruturais e metabólicas. Ele compõe aminoácidos, proteínas, enzimas, ácidos nucleicos, clorofila e compostos ligados à transferência de energia. Por isso, a deficiência reduz crescimento, área foliar, fotossíntese e acúmulo de biomassa. Os sintomas de deficiência aparecem com frequência em folhas velhas, devido à mobilidade do N no floema. A planta remobiliza o nutriente de tecidos senescentes para órgãos jovens. A clorose em folhas velhas reflete degradação de clorofila e redistribuição do N (Masclaux-Daubresse et al., 2010; Cassim et al., 2024).

O excesso de N também gera problemas. Crescimento vegetativo desproporcional pode aumentar acamamento, retardar maturação e alterar relação entre

parte vegetativa e órgãos comerciais. Além disso, doses acima da capacidade de absorção elevam perdas ambientais. Assim, a nutrição nitrogenada adequada exige equilíbrio entre suprimento, demanda, estádio da cultura e capacidade de assimilação.

As plantas absorvem N sobretudo como NO_3^- e NH_4^+. A forma predominante no solo depende de oxigenação, pH, atividade microbiana e fertilização. Em solos aerados, o NO_3^- tende a predominar por nitrificação. Em ambientes com baixa oxigenação ou pH mais restritivo, o NH_4^+ pode ter maior participação. A absorção ocorre por transportadores de membrana com sistemas de alta e baixa afinidade. Esses sistemas permitem captação sob baixa ou alta concentração externa. Santos et al. (2017) identificaram, classificaram e analisaram a transcrição de transportadores de nitrato e amônio em *Coffea*, evidência de base molecular para absorção e regulação do N.

A razão NO_3^-/NH_4^+ afeta crescimento, pH da rizosfera e absorção de outros nutrientes. Absorção de NH_4^+ tende a acidificar a rizosfera. Absorção de NO_3^- pode elevar pH ao redor das raízes. Essa alteração interfere na disponibilidade de fósforo, micronutrientes e cátions. Portanto, a forma química do N não afeta apenas o metabolismo nitrogenado; ela altera também o ambiente químico próximo às raízes.

O NO_3^- absorvido precisa ser reduzido a NO_2^- pela nitrato redutase. Depois, o NO_2^- é reduzido a NH_4^+ pela nitrito redutase. O NH_4^+ formado ou absorvido diretamente é incorporado a aminoácidos pela via GS-GOGAT, com ação de glutamina sintetase e glutamato sintetase. Miflin e Habash (2002) discutem a função da glutamina sintetase e da glutamato desidrogenase na assimilação de N e nas possibilidades de melhoria do uso do nutriente pelas culturas. Liu et al. (2022) e Fortunato et al. (2023) tratam nitrato redutase, nitrito redutase e ciclo GS-GOGAT como etapas centrais da conversão de N mineral em N orgânico.

A assimilação do N depende de energia e esqueletos de carbono. Por isso, está ligada à fotossíntese. Plantas com limitação hídrica, baixa radiação ou estresse reduzem capacidade de assimilação, mesmo quando há N disponível no solo. O NH_4^+ possui menor custo de redução, mas pode ser tóxico em excesso. A planta precisa assimilá-lo rapidamente para evitar desequilíbrios metabóli-

cos. O NO_3^- tem maior custo energético, mas também pode atuar como sinal metabólico e ser armazenado em vacúolos. Essa diferença explica por que a resposta vegetal à forma nitrogenada varia entre espécies, ambientes e fases de crescimento.

A remobilização de N permite transferir o nutriente de folhas velhas, caules ou raízes para órgãos em crescimento ou estruturas reprodutivas. Em culturas de grãos, parte do N acumulado no vegetativo é remobilizada para sementes. Masclaux-Daubresse et al. (2010) apresentam absorção, assimilação e remobilização como eixos para agricultura produtiva e mais eficiente no uso do N. A eficiência da remobilização influencia teor de proteína e rendimento. Em trigo, o N afeta número de espigas, massa de grãos e qualidade industrial. Em milho, o N participa da manutenção da área foliar e do enchimento de grãos.

CONCLUSÕES

O N é nutriente-chave para produtividade agrícola, mas também é elemento de alta complexidade ambiental. Sua dinâmica envolve atmosfera, solo, microrganismos, água e planta. O manejo correto exige compreensão de processos, não apenas cálculo de dose.

A maior parte do N do solo está na matéria orgânica. A disponibilidade para plantas depende da mineralização e da permanência em formas absorvíveis. O NH_4^+ pode ser retido no complexo de troca, imobilizado, nitrificado ou absorvido. O NO_3^- é móvel, absorvível e suscetível à lixiviação. A nitrificação amplia a disponibilidade de NO_3^-, mas também aumenta risco de perda e acidificação. A desnitrificação remove N sob baixa disponibilidade de oxigênio. A volatilização reduz eficiência da ureia aplicada na superfície.

A ciclagem do N depende de resíduos, palhada, textura, matéria orgânica, rotação e atividade microbiana. Sistemas conservacionistas podem aumentar a estabilidade do N no solo, desde que haja sincronia entre decomposição e demanda da cultura. Palhada de gramíneas protege o solo, mas pode imobilizar N. Leguminosas adicionam N, mas podem liberar o nutriente em período não coincidente com a cultura seguinte.

A FBN é uma das estratégias mais sólidas para reduzir dependência de fertilizantes industriais. Em leguminosas, a tecnologia está consolidada, mas exige

inoculante de qualidade, solo corrigido e condições favoráveis à nodulação. Em gramíneas e cana-de-açúcar, a resposta deve ser interpretada com cautela, pois pode envolver promoção de crescimento e não apenas fixação direta de N_2.

REFERÊNCIAS

AITA, C. et al. Dinâmica do nitrogênio no solo durante o ciclo do milho em sucessão à aveia preta e ervilhaca comum. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2004.

ALCÂNTARA, R. M. C. M. de et al. Fixação biológica de nitrogênio. Embrapa, 2018.

BARBERENA, I. M. et al. Use of urease inhibitors to reduce ammonia volatilization in Amazonian soils. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2019.

BECHE, E. et al. Eficiência de uso de nitrogênio em cultivares de trigo pioneiras e modernas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2014.

BREDA, F. A. F. et al. Produtividade de milho na presença de doses de N e de inoculação de Herbaspirillum seropedicae. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2016.

CABEZAS, W. A. R. L. et al. Imobilização de nitrogênio da ureia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

CAMPELO, D. H. et al. Growth, production and water and nitrogen use efficiency of maize under water depths and nitrogen fertilization. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2019.

CASSIM, B. M. A. R. et al. Nitrogen: from discovery, plant assimilation, sustainable usage to current enhanced efficiency fertilizers technologies - A review. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 48, e0230037, 2024.

CORRÊA, J. C. et al. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2007.

DARTORA, J. et al. Adubação nitrogenada associada à inoculação com Azospirillum brasilense e Herbaspirillum seropedicae na cultura do milho. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2013.

DÖBEREINER, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. Estudos Avançados, 1990.

EMBRAPA. Fixação biológica de nitrogênio: uma revisão. Londrina: Embrapa Soja, 2024.

FIOREZE, C.; CERETTA, C. A.; GIACOMINI, S. J.; TRENTIN, G.; LORENSINI, F. Liberação do N em solos de texturas contrastantes com ou sem adubos orgânicos. Ciência Rural, Santa Maria, v. 42, n. 7, p. 1187-1192, 2012.

FORTUNATO, S. et al. The role of glutamine synthetase and glutamate synthase in nitrogen assimilation and crop productivity. 2023.

GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. Avaliação da disponibilidade do nitrogênio do solo estimada por métodos químicos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 24, p. 93-101, 2000.

HUNGRIA, M. et al. Inoculation with selected strains of Azospirillum brasilense and A. lipoferum improves yields of maize and wheat in Brazil. Plant and Soil, 2010.

KOLCHINSKI, E. M.; SCHUCH, L. O. B.; PESKE, S. T. Eficiência no uso do nitrogênio por cultivares de aveia branca de acordo com a adubação nitrogenada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2003.

LIU, X. et al. Nitrogen assimilation in plants: current status and future prospects. 2022.

MASCLAUX-DAUBRESSE, C. et al. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. Annals of Botany, 2010.

MIFLIN, B. J.; HABASH, D. Z. The role of glutamine synthetase and glutamate dehydrogenase in nitrogen assimilation and possibilities for improvement in the nitrogen utilization of crops. Journal of Experimental Botany, 2002.

QUADROS, P. D. et al. Desempenho agronômico a campo de híbridos de milho inoculados com Azospirillum brasilense. Revista Ceres, 2014.

RODRIGUES, N. E. et al. Mineral nitrogen dynamics, mineralization and nitrification in soybean fields under no-tillage and conventional tillage in Amazonian tropical soils. Ambiente & Água, 2026.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; OLIVEIRA, R. H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 38, n. 2, p. 301-309, 2003.

SANTOS, T. B. dos et al. Genome-wide identification, classification and transcriptional analysis of nitrate and ammonium transporters in Coffea. Genetics and Molecular Biology, v. 40, n. 1, supl. 1, p. 346-359, 2017.

SILVA, E. C. et al. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2005.

SILVA, E. C. et al. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com plantas de cobertura. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2006.

SILVA, E. C. et al. Utilização do nitrogênio da palha de milho e de adubos verdes pela cultura do milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2008.

SILVA, K. G. da et al. Nitrogen efficiency indexes for evaluating nitrogen uptake and use in ornamental bromeliad's root system and tank. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 53, n. 6, p. 703-709, 2018.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. Bragantia, 2010.

SOARES, J. R. et al. Dynamics of ammonia volatilization from NBPT-treated urea under contrasting soil pH. Scientia Agricola, 2023.

TODESCHINI, M. H. et al. Eficiência de uso do nitrogênio em cultivares modernas de trigo. Bragantia, 2016.

VARGAS, L. K. et al. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sistema plantio direto e convencional. Ciência Rural, 2005.

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2014.

VIERO, F. et al. Urease inhibitor and irrigation management to mitigate ammonia volatilization from urea in no-till corn. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2017.

VIEIRA, R. F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 163 p.

WEBER, M. A.; MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em experimento de longa duração. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, p. 429-437, 2009.

CAPÍTULO 2

FÓSFORO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: FRAÇÕES FOSFATADAS, DISPONIBILIDADE NO SOLO E METABOLISMO VEGETAL

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Ariane Ono de Vasconcelos; Wendel Vanderley Torres dos Santos; Antonio Carlos Inforçato Rodrigues; Patrik Francisco de Almeida Marques; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; João Eduardo Pereira Cardoso; Vitória Marciele Melo da Silva; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Joab Freitas de Oliveira; Aline Nazaré Habib Guedes; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: O fósforo (P) regula processos metabólicos e produtivos das plantas, pois participa da transferência de energia, da formação de ácidos nucleicos, da constituição de fosfolipídios, da ativação enzimática, da divisão celular, do crescimento radicular e da formação de estruturas reprodutivas. Apesar dessa função, o P apresenta baixa mobilidade no solo e forte interação com minerais de ferro, alumínio e cálcio, o que reduz sua disponibilidade em solos tropicais intemperizados. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre frações fosfatadas, adsorção, disponibilidade no solo, fósforo orgânico, atividade de fosfatases, micorrizas arbusculares e funções do P no metabolismo vegetal. A análise mostra que a eficiência da adubação fosfatada depende da interação entre mineralogia, textura, pH, matéria orgânica, histórico de manejo, sistema de cultivo, forma de aplicação, fonte fertilizante, atividade biológica e demanda da cultura. Em solos tropicais, baixa concentração de P na solução não indica falta total do nutriente no sistema, mas predomínio de formas adsorvidas, orgânicas ou de baixa labilidade. O manejo técnico do P deve integrar diagnóstico químico, interpretação das frações, correção da acidez, plantas de cobertura, micorrizas, escolha adequada da fonte e sincronização entre aplicação e crescimento radicular.

Palavras-chave: adubação fosfatada; adsorção de fósforo; fósforo orgânico; fosfatases; micorrizas arbusculares.

INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente que atua na fertilidade do solo e na nutrição mineral das plantas, pois participa de processos bioquímicos ligados à transferência de energia, à síntese de ácidos nucleicos, à formação de fosfolipídios, à sinalização celular, à ativação enzimática, ao crescimento radicular e ao desen-

volvimento reprodutivo (BARROS, 2020). A presença do P em adenosina trifosfato (ATP), adenosina difosfato (ADP), ácido desoxirribonucleico (DNA), ácido ribonucleico (RNA) e membranas celulares explica sua relação com crescimento inicial, estabelecimento da cultura e produção de grãos, frutos, fibras ou biomassa (NASCIMENTO, 2024).

A limitação agronômica do P decorre da baixa fração presente em solução e da forte interação com a fase sólida. Em solos tropicais, óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), argilas de carga variável, acidez e alto grau de intemperismo aumentam a adsorção de fosfato e reduzem sua mobilidade. Santos, Gatiboni e Kaminski (2008) discutiram fatores que afetam a disponibilidade do P e o manejo da adubação fosfatada em plantio direto; os autores destacaram a baixa mobilidade do nutriente e os riscos da aplicação superficial contínua em sistemas sem incorporação.

A disponibilidade de P depende de equilíbrio dinâmico entre solução do solo, frações lábeis, frações moderadamente lábeis, formas orgânicas, precipitados e formas pouco lábeis associadas a minerais. Esse equilíbrio responde ao pH, à mineralogia, à textura, ao teor de matéria orgânica, ao histórico de adubação, à presença de resíduos vegetais, à atividade microbiana, às micorrizas e à demanda radicular (RHEINHEIMER, 2020). Por isso, a interpretação do P exige mais que um teor extraído por método químico. O teor disponível indica parte do suprimento imediato; o sistema de frações ajuda a entender a capacidade de reposição do P da solução.

A adsorção de P constitui uma das causas da baixa eficiência inicial de fertilizantes fosfatados em solos tropicais. Rolim Neto et al. (2004) estudaram adsorção de P, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas básicas e ultrabásicas do Alto Paranaíba, em Minas Gerais, e relacionaram atributos mineralógicos ao processo de retenção de P. Esse tipo de estudo mostra que a resposta à adubação fosfatada não depende apenas da dose, mas da mineralogia que regula adsorção, dessorção e capacidade tampão.

O manejo deste nutriente em plantio direto exige leitura própria. A ausência de revolvimento concentra fertilizante, matéria orgânica e raízes finas nas camadas superficiais. Essa estratificação pode elevar teores de P na camada superior e

manter baixa disponibilidade em profundidade (SOMAVILLA, 2020). Em anos secos, a concentração superficial pode limitar absorção, pois o solo da superfície perde água antes das camadas subsuperficiais. Assim, a distribuição vertical do P deve ser interpretada em conjunto com raiz, água e sistema de cultivo.

A fração orgânica do P também precisa entrar na interpretação. Resíduos vegetais, biomassa microbiana, fosfatases e micorrizas participam da liberação, retenção e transferência de P para as plantas. Dalla Costa et al. (2004) avaliaram fosfatases em solo sob culturas de cobertura micorrízicas e não micorrízicas, com foco na dinâmica biológica do P. Carneiro et al. (2004) avaliaram indicadores biológicos associados ao ciclo do P em solos de Cerrado sob plantio direto e preparo convencional, o que mostra que o sistema de manejo altera componentes biológicos ligados ao nutriente.

As micorrizas arbusculares ampliam o volume de solo explorado pelas raízes por meio de hifas extrarradiculares. Essa simbiose pode aumentar a absorção de P em solos de baixa disponibilidade, sobretudo quando o suprimento na solução é limitado pela difusão. Antoniolli e Kaminski (1991) discutiram micorrizas e absorção de P, zinco e cobre em solos com disponibilidade subótima. Bressan et al. (2001) avaliaram fungos micorrízicos arbusculares e P no crescimento e nos teores de nutrientes em plantas, com resposta dependente do fungo e do suprimento de P.

Este capítulo discute a dinâmica das frações fosfatadas, a disponibilidade do P no solo e suas funções no metabolismo vegetal. A hipótese interpretativa é que a eficiência agronômica do P depende da articulação entre processos químicos, físicos, biológicos e fisiológicos. O manejo adequado não se limita à aplicação de fertilizante; ele exige diagnóstico do solo, compreensão das frações, escolha de fonte, posicionamento do fertilizante, manejo da acidez, atividade radicular e estímulo aos mecanismos biológicos de aquisição.

DESENVOLVIMENTO

Frações fosfatadas e dinâmica do P no solo

O P no solo ocorre em formas inorgânicas e orgânicas, com graus distintos de disponibilidade. A fração inorgânica inclui fosfato em solução, fosfato adsorvido em superfícies minerais, fosfato ligado a Fe e Al, fosfato de cálcio e formas

oclusas em minerais. A fração orgânica inclui fosfatos de inositol, fosfolipídios, ácidos nucleicos e compostos presentes em resíduos vegetais e biomassa microbiana (SILVA, 2025). A disponibilidade imediata depende da fração em solução e de formas lábeis capazes de repor o P removido pela raiz.

A distinção entre P lábil, moderadamente lábil e pouco lábil ajuda a interpretar a eficiência da adubação. Formas lábeis repõem rapidamente a solução do solo. Formas moderadamente lábeis podem contribuir em escala mais longa, a depender de pH, atividade radicular, ácidos orgânicos, mineralogia e microbiota. Formas pouco lábeis possuem baixa taxa de reposição e tendem a participar mais do estoque do que do suprimento imediato. Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) determinaram frações preferenciais de acúmulo de P após adição de fosfato solúvel em Latossolo argiloso no plantio direto, com registro de acúmulo em frações distintas do solo.

Silva et al. (2003) avaliaram frações de P em três Latossolos e analisaram histórico de uso, adubação fosfatada, inoculação micorrízica e cultivo com braquiária e soja. O estudo separou P ligado a Al, Fe e Ca e também frações por resina, bicarbonato de sódio, hidróxido de sódio, ácido clorídrico e digestão ácida. Esse tipo de abordagem é necessário porque o P residual não permanece em uma única forma. O fertilizante aplicado pode entrar em frações lábeis, ser incorporado à biomassa, ser adsorvido a óxidos ou migrar para formas de menor reversibilidade.

Em solos com longo histórico de adubação, parte do P acumulado pode manter algum grau de biodisponibilidade. Conte, Anghinoni e Rheinheimer (2003) e Santos, Gatiboni e Kaminski (2008) sustentam a interpretação de que o acúmulo superficial em plantio direto aumenta o P extraível nas camadas superiores, mas não elimina a necessidade de avaliar distribuição vertical e demanda radicular. A leitura superficial isolada pode superestimar o suprimento quando o período seco limita o contato entre raiz e camada enriquecida.

O fracionamento químico, como o método de Hedley e suas adaptações, permite separar formas de P por extratores sequenciais (FERNANDES, 1993).. Essa técnica não deve ser confundida com disponibilidade direta para a planta, mas fornece leitura do estoque em compartimentos de mobilidade contrastante. O valor agronômico do fracionamento está em mostrar para onde o P aplicado

se desloca dentro da matriz do solo e quanto permanece em frações com maior chance de reposição da solução.

A dinâmica do P também depende da rizosfera. Raízes alteram pH local, exsudam ácidos orgânicos, liberam fosfatases, exploram microsítios e interagem com micorrizas (DALLA, 2003). Essas alterações podem aumentar a solubilização, a mineralização de P orgânico ou a exploração de zonas além da superfície radicular. Assim, a fração disponível medida em amostra composta de solo não expressa toda a capacidade de aquisição de uma planta com raiz ativa e simbiose micorrízica eficiente (LUCHESE, 2025).

Adsorção, retenção e capacidade tampão de P

De acordo com Resende e Furtini Neto (2007), a adsorção de P ocorre quando íons fosfato se ligam às superfícies de minerais, sobretudo óxidos e hidróxidos de Fe e Al em solos ácidos e altamente intemperizados. O processo reduz a concentração de P na solução, mas também forma reservatório capaz de repor parte do nutriente removido pelas raízes. A força dessa ligação depende da mineralogia, da área superficial, do pH, da presença de matéria orgânica e da competição com outros ânions.

Rolim Neto et al. (2004) estudaram adsorção de P, superfície específica e atributos mineralógicos em solos do Alto Paranaíba, em Minas Gerais. O trabalho relacionou a adsorção às propriedades mineralógicas de solos desenvolvidos de rochas vulcânicas básicas e ultrabásicas. A interpretação agronômica é direta: solos com alta capacidade de adsorção exigem estratégia de manejo distinta daquela adotada em solos com menor capacidade tampão.

O fator capacidade de fósforo expressa a resistência do solo a alterações na concentração de P em solução. Broggi et al. (2011) estudaram solos de Pernambuco com mineralogia contrastante e avaliaram o efeito do pH na capacidade máxima de adsorção de P. Solos com alto fator capacidade podem exigir maior aporte para elevar o P disponível, mas também tendem a manter o nutriente por mais tempo. Solos com baixo fator capacidade respondem com aumento rápido da solução, mas podem perder suprimento quando há intensa remoção pela cultura.

De acordo com Braga (2026), o termo “fixação de P” deve ser usado com cautela. Ele descreve a transformação do fosfato aplicado em formas de menor disponibilidade, mas não indica irreversibilidade absoluta. Parte do P adsorvido pode retornar à solução, sobretudo quando há remoção pela raiz, mudança de pH, competição por sítios de adsorção, exsudação de compostos orgânicos ou atividade microbiana. Por isso, a reversibilidade das frações deve ser interpretada com base no solo, no tempo de contato e na demanda biológica.

A matéria orgânica pode reduzir a adsorção de P por competição de ácidos orgânicos pelos sítios de ligação ou por complexação de Fe e Al. (ROLIM NETO et al. , 2004). Porém, seu efeito não é uniforme. Ela também pode imobilizar P na biomassa microbiana ou formar compostos orgânicos que exigem mineralização. A função da matéria orgânica no ciclo do P depende de decomposição, atividade enzimática, pH e tipo de resíduo.

Em solos do Cerrado, adubação fosfatada corretiva e adubação de manutenção precisam ser separadas. Resende e Furtini Neto (2007), em documento da Embrapa Cerrados, discutiram manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado, com atenção à dinâmica do P oriundo de fertilizantes e ao aproveitamento pelas plantas. A adubação corretiva busca elevar o nível de disponibilidade do solo, enquanto a manutenção repõe exportação e sustenta o sistema produtivo.

Disponibilidade de P e manejo da adubação fosfatada

A disponibilidade de P depende da concentração em solução e da capacidade do solo de repor essa concentração durante o crescimento da cultura (BRAGA, 2006). Como o transporte do P até a raiz ocorre, em boa parte, por difusão, a distância entre fertilizante, raiz e zona de absorção tem efeito direto. Em solos secos, compactados ou com crescimento radicular limitado, a difusão e a exploração do solo diminuem, mesmo quando o teor químico indica nível adequado.

Santos, Gatiboni e Kaminski (2008) discutiram fatores que afetam a disponibilidade do P e o manejo da adubação fosfatada em plantio direto. O artigo ressalta que a baixa mobilidade do P e a aplicação superficial podem levar ao

acúmulo na camada superior do solo. Essa estratificação pode beneficiar culturas com raízes superficiais em anos úmidos, mas pode limitar absorção em períodos secos ou em cultivos com raiz ativa em profundidade.

O manejo da adubação fosfatada envolve fonte, dose, localização e estratégia temporal. Fontes solúveis tendem a elevar rapidamente o P disponível, mas também aumentam contato inicial com sítios de adsorção (RHEINHEIMER, 2020). Fosfatos naturais dependem de reatividade, acidez do solo, tempo de contato e cultura. A aplicação localizada no sulco aumenta concentração próxima à raiz e pode melhorar crescimento inicial (SOMAVILLA, 2025). A aplicação a lanço pode corrigir maior volume de solo, mas sua eficiência depende da incorporação, do sistema de cultivo e do histórico de adubação.

Sousa, Rein e Santos Junior (2016), em Comunicado Técnico da Embrapa Cerrados, afirmam que a resposta das culturas à adubação fosfatada depende da disponibilidade inicial de P no solo, de outros nutrientes, da espécie, da variedade vegetal e das condições climáticas. O documento também aponta que a adubação fosfatada busca elevar a disponibilidade de P a níveis satisfatórios para aumentar o potencial produtivo quando água e demais nutrientes não limitam o sistema.

Em cana-de-açúcar no Cerrado, Rein et al. (2015) registraram que a adubação fosfatada tem sido baseada em doses altas de P no plantio, com aplicação no fundo do sulco, e citaram valores de até 180 kg ha^{-1} de P_2O_5. Esse caso mostra que cultura, espaçamento e sistema de plantio interferem no posicionamento do P. Em culturas anuais de espaçamento estreito, a lógica de aplicação pode mudar, pois a distribuição de raízes e o fechamento do dossel diferem do sistema da cana-de-açúcar.

A correção da acidez influencia disponibilidade de P. Em solos muito ácidos, Fe e Al aumentam retenção e reduzem disponibilidade. A calagem reduz Al tóxico, melhora crescimento radicular e pode aumentar exploração de solo. Porém, pH muito alto pode favorecer precipitação com cálcio (DE MELLO PRADO, 2003). O intervalo de pH adequado deve ser definido por solo e cultura, sem tratar calagem como solução isolada para a baixa disponibilidade de P.

Fósforo orgânico, fosfatases e atividade biológica

A fração orgânica do P representa parte variável do P total do solo e atua como reservatório dependente de mineralização (SILVA, 2025). Essa fração inclui compostos derivados de resíduos vegetais, raízes, microrganismos e matéria orgânica estabilizada. Sua contribuição para a nutrição vegetal depende da atividade de fosfatases e da demanda microbiana e radicular.

As fosfatases catalisam a hidrólise de compostos orgânicos de P, com liberação de fosfato inorgânico. A atividade dessas enzimas aumenta quando há demanda biológica por P e presença de substratos orgânicos. Dalla Costa et al. (2004) avaliaram a atividade de fosfatases sob culturas de cobertura micorrízicas e não micorrízicas, o que permite relacionar escolha da cobertura e dinâmica biológica do P.

Carneiro et al. (2004) estudaram indicadores biológicos associados ao ciclo do P em solos de Cerrado sob plantio direto e preparo convencional. O trabalho avaliou áreas em Latossolo Vermelho-Amarelo e comparou sistemas de manejo, plantas de cobertura e Cerrado nativo. Esses resultados sustentam a interpretação de que o manejo do solo modifica a atividade biológica ligada ao P.

A atividade biológica não substitui adubação em solos com deficiência forte, mas pode melhorar aproveitamento do P aplicado e mobilização de reservas orgânicas. O erro técnico é tratar fosfatases, microrganismos ou bioinsumos como substitutos diretos do fertilizante em qualquer condição (DE MELLO PRADO, 2003). O efeito biológico depende de substrato, umidade, temperatura, pH, raízes ativas, fonte de carbono e nível inicial de P.

Segundo Pacheco (2008), as plantas de cobertura interferem no ciclo do P por meio de raízes, resíduos e exsudatos. Espécies com maior produção de raízes finas e associação micorrízica podem aumentar exploração do solo. Espécies com resíduos de decomposição rápida podem liberar P em curto prazo. Em sistemas de rotação, o valor dessas plantas depende da sincronização entre liberação do P e absorção pela cultura seguinte.

O P orgânico também se relaciona com matéria orgânica e histórico de uso do solo. Pereira et al. (2010) avaliaram carbono, matéria orgânica leve e fósforo

remanescente em Cerrado sob sistemas de manejo, com associação entre atributos orgânicos e comportamento do P. Assim, a análise do P deve integrar química e biologia do solo, pois parte do suprimento passa por transformação microbiana e enzimática.

Integração do manejo do P em solos tropicais

O manejo do P deve articular diagnóstico químico, histórico de adubação, mineralogia, textura, pH, matéria orgânica, raiz e sistema de cultivo. Em solos de alta adsorção, a estratégia pode envolver correção gradual ou corretiva, conforme teor disponível, cultura e meta produtiva. Em solos com acúmulo superficial por plantio direto, a distribuição vertical deve ser avaliada, pois teores altos na camada de 0 a 5 cm podem não representar suprimento adequado em camadas mais profundas (PEREIRA et al., 2010)

A escolha da fonte fosfatada depende de solubilidade, reatividade, custo, cultura, pH e tempo de resposta esperado. Fontes solúveis são adequadas quando a cultura exige resposta rápida. Fosfatos naturais reativos podem funcionar em solos ácidos e em sistemas com maior tempo de reação, mas não devem ser usados sem diagnóstico de reatividade e adequação ao ambiente. A fonte deve ser escolhida com base no sistema, não apenas no preço por unidade de P_2O_5 (DE MELLO PRADO, 2003).

A localização do fertilizante define o contato com raízes e sítios de adsorção. Aplicação localizada aumenta concentração próxima à raiz e favorece crescimento inicial, mas explora volume menor de solo (RHEINHEIMER, 2020). Aplicação a lanço corrige área maior, mas pode acentuar acúmulo superficial quando não há incorporação. De acordo Broggi (2011), o manejo biológico deve complementar, não substituir, o manejo químico. Micorrizas, fosfatases, plantas de cobertura e atividade microbiana aumentam a eficiência de aquisição e reciclagem, mas dependem de ambiente favorável. Solo compactado, seco, ácido, sem raiz ativa ou com baixa diversidade de plantas reduz o efeito biológico.

A interpretação de P disponível precisa considerar extrator químico e tipo de solo. Métodos como Mehlich-1 podem superestimar ou subestimar disponibilidade conforme teor de argila, mineralogia e presença de fosfatos naturais.

Resina e outros extratores apresentam outra lógica de extração. A recomendação deve seguir calibração regional e cultura de interesse, sem extrapolação automática entre solos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fósforo apresenta baixa mobilidade e forte interação com a fase sólida do solo. Em solos tropicais, óxidos de ferro e alumínio, textura, acidez e histórico de manejo controlam sua disponibilidade. Parte do P aplicado permanece em frações de reposição lenta, o que reduz a eficiência inicial da adubação e sustenta seu efeito residual.

O manejo deve considerar a capacidade de adsorção e tamponamento do solo, o posicionamento do fertilizante, a demanda da cultura e a estratificação no plantio direto. Matéria orgânica, fosfatases, micorrizas, cobertura do solo e atividade radicular favorecem a aquisição e a reciclagem do nutriente (MOURA, 2001). Assim, o manejo integrado do P aumenta a eficiência agronômica, preserva o efeito residual e reduz perdas de um recurso mineral finito.

REFERÊNCIAS

ANTONIOLLI, Z. I.; KAMINSKI, J. Micorrizas. Ciência Rural, Santa Maria, 1991.

BARROS, José. Fertilidade do solo e Nutrição das plantas. 2020.

BRESSAN, W.; SIQUEIRA, J. O.; VASCONCELLOS, C. A.; PURCINO, A. A. C. Fungos micorrízicos e fósforo, no crescimento, nos teores de nutrientes e na produção do sorgo e soja consorciados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n. 2, p. 315-323, 2001.

BROGGI, F. et al. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente contrastantes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. Ciência e Agrotecnologia, 2011.

BRAGA, Graziela. Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida. Doctoral Theis). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, São Paulo, 2006.

CARNEIRO, R. G. et al. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e preparo convencional. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2004.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 893-900, 2003.

DALLA COSTA, M. et al. Fosfatases na dinâmica do fósforo do solo sob culturas de cobertura com espécies micorrízicas e não micorrízicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2004.

DE MELLO DE MELLO PRADO, Renato. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. Revista Biociências, v. 9, n. 3, 2003.

FERNANDES, Maria Leonor Vizeu. Caracterização do fósforo de alguns solos segundo os métodos de Chang and Jackson (1957) e de Hedley et al.(1982). 1993.

LUCHESE, Eduardo Bernardi; FAVERO, Luzia Otilia Bortotti; LENZI, Ervim. Fundamentos da química do solo: teoria e prática. Freitas Bastos, 2025.

MOURA, W. M.; LIMA, P. C.; CASALI, V. W. D.; PEREIRA, P. R. G.; CRUZ, C. D. Eficiência nutricional para fósforo em linhagens de pimentão. Horticultura Brasileira, v. 19, n. 3, p. 306-312, 2001.

NASCIMENTO, Daniel Bezerra do et al. Ciclagem de nitrogênio, fósforo e potássio em ecossistemas de pastagem. **Ciência Animal Brasileira**, v. 25, p. e-76743, 2024.

PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em ambiente de Cerrado sob sistemas de manejo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2010.

REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos; NUNES, R. de S.; KORNDÖRFER, G. H. Manejo da adubação fosfatada para cana-de-açúcar no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. 12 p. (Circular Técnica, 29).

REIS, E. F. et al. Absorção de fósforo em doze genótipos de milho inoculados com fungo micorrízico arbuscular em solo de Cerrado. Ciência Rural, v. 38, n. 9, p. 2441-2447, 2008.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 32 p.

ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba, Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 953-964, 2004.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. Ciência Rural, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SILVA, M. A. et al. Frações de fósforo em Latossolos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2003.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. de D. G. dos. Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no Cerrado. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2016. 10 p. (Comunicado Técnico, 33).

SOMAVILLA, André et al. COMO MANEJAR FÓSFORO NO SISTEMA DE PRODUÇÃO.

SILVA, Hellen Fernanda Oliveira da et al. Resíduos orgânicos como base para fertilizantes argilominerais fosfatados em solos tropicais: desenvolvimento e avaliação agronômica. 2025.

RHEINHEIMER, D. D. et al. Ciclo biogeoquímico do fósforo, diagnóstico de disponibilidade e adubação fosfatada. Porto Alegre: Autores, 2020.

CAPÍTULO 3

POTÁSSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: FORMAS NO SOLO, TRANSPORTE DE FOTOASSIMILADOS E RELAÇÕES HÍDRICAS

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Daniele Soares Barroso; Vivian Soraia da Silva Santos; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; João Eduardo Pereira Cardoso; Gabrielle Siqueira de Souza; Elaidy Laura Oliveira Cardoso; Natanael Lucena Ferreira; Damiana Roberta dos Santos Alvelino; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Carlos Afonso Machado; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: O potássio (K) é macronutriente de função iônica, associado ao equilíbrio osmótico, à ativação enzimática, à regulação estomática, ao transporte de fotoassimilados e à eficiência de uso da água. No solo, ocorre como K em solução, K trocável, K não trocável, K estrutural e K reciclado por resíduos vegetais. A disponibilidade para as plantas depende da textura, da capacidade de troca de cátions, da mineralogia, da umidade, do histórico de adubação, da exportação pela colheita, da ciclagem por palhada e do crescimento radicular. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre a dinâmica das formas de K no solo, os processos de transporte e perda, a função do K no carregamento e fluxo de fotoassimilados pelo floema e sua participação nas relações hídricas das plantas. A análise mostra que o K não atua apenas como nutriente de reposição. Ele regula turgor celular, condutância estomática, fotossíntese, translocação de açúcares, crescimento de órgãos dreno e resposta ao déficit hídrico. Em solos tropicais, o manejo do K exige integração entre análise de solo, textura, capacidade de retenção, risco de lixiviação, palhada, parcelamento da adubação, profundidade radicular e regime hídrico.

Palavras-chave: adubação potássica; potássio trocável; lixiviação de potássio; floema; eficiência de uso da água.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é requerido em alta quantidade pelas plantas e difere de nitrogênio (N) e fósforo (P) por não integrar estruturas orgânicas estáveis, como proteínas, ácidos nucleicos ou fosfolipídios. Sua função está ligada à forma iônica K^+, que regula potencial osmótico, equilíbrio elétrico, ativação enzimática, turgor celular, abertura estomática, transporte de solutos e tolerância a estresses.

Sardans e Peñuelas (2021) associaram o K ao controle de potenciais transmembrana, transporte de água, nutrientes e metabólitos, além de respostas a seca, salinidade, encharcamento e herbivoria.

No solo, o K ocorre em formas de disponibilidade contrastante: K na solução, K trocável, K não trocável e K estrutural. O K da solução é absorvido diretamente pelas raízes, mas representa fração pequena do estoque total. O K trocável, retido em cargas negativas de coloides, repõe a solução em curto prazo. O K não trocável, associado a intercamadas de minerais 2:1, pode contribuir para o suprimento quando a fração trocável sofre depleção. O K estrutural, presente na rede cristalina de minerais, participa do suprimento apenas em escala temporal longa. Medeiros et al. (2010) afirmaram que a disponibilidade de K às plantas depende dos teores de K não trocável, K trocável e K solúvel, os quais variam conforme o grau de desenvolvimento pedogenético dos solos.

Em solos tropicais, a interpretação do K exige atenção à textura, à capacidade de troca de cátions (CTC), à mineralogia e ao regime hídrico. Solos arenosos e com baixa CTC apresentam maior risco de lixiviação, enquanto solos argilosos retêm mais K em formas trocáveis ou não trocáveis. Werle, Garcia e Rosolem (2008) estudaram lixiviação de K em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo, com solos de textura média e argilosa que receberam 0, 60, 120 e 180 kg ha^{-1} de K_2O na soja por seis anos.

A ciclagem de K por resíduos vegetais tem efeito direto no balanço do nutriente. Como o K não compõe moléculas orgânicas estruturais, ele pode ser liberado com rapidez da palhada após chuva ou decomposição inicial. Torres e Pereira (2008) estudaram a dinâmica do K em resíduos de plantas de cobertura no Cerrado e avaliaram oito coberturas vegetais, entre elas milheto, braquiária, sorgo-forrageiro e crotalária. O estudo mostra que a escolha da cobertura altera o retorno de K ao sistema.

Na planta, o K participa da regulação do transporte de fotoassimilados. O floema transporta açúcares, aminoácidos, íons e sinais entre órgãos fonte e dreno. Dreyer, Gomez-Porras e Riedelsberger (2017) propuseram o conceito de "bateria de potássio", no qual gradientes de K^+ podem fornecer energia móvel para processos de transporte em tecidos vasculares, como recarregamento de sacarose no floema.

O K também está ligado às relações hídricas. A entrada e a saída de K^+ nas células-guarda alteram potencial osmótico, turgor e abertura estomática. Sob déficit hídrico, esse controle afeta transpiração, assimilação de CO_2 e eficiência de uso da água. Catuchi et al. (2012) avaliaram cultivares de soja sob regimes hídricos contrastantes e adubação potássica. Mendes et al. (2013) estudaram cinco genótipos de eucalipto sob disponibilidade hídrica e adubação potássica. Esses trabalhos reforçam que o K deve ser analisado junto com água, raiz e resposta fisiológica.

Este capítulo discute a dinâmica das formas de K no solo, o transporte de K até as raízes, a função do nutriente no transporte de fotoassimilados e sua relação com o estado hídrico das plantas. A hipótese interpretativa é que a eficiência agronômica do K depende da coordenação entre solo, água, raiz, floema e regulação osmótica, e não apenas do teor trocável medido na análise de solo.

DESENVOLVIMENTO

Dinâmica das formas de potássio no solo

O K no solo está distribuído entre solução, complexo de troca, intercamadas minerais, estruturas cristalinas e resíduos vegetais. O K em solução é a forma imediatamente absorvida, mas sua concentração depende de reposição contínua (CATUCHI et al. (2012). O K trocável está adsorvido em cargas negativas de argilas e matéria orgânica, com maior disponibilidade para raízes. O K não trocável pode ficar retido em intercamadas de minerais como micas e vermiculitas. O K estrutural compõe minerais primários e libera K por intemperismo em escala temporal longa.

De acordo com Torres e Pereira (2008), essa divisão não representa compartimentos isolados. As formas mantêm equilíbrio dinâmico. Quando a planta absorve K^+ da solução, parte do K trocável repõe essa fração. Quando o K trocável diminui, parte do K não trocável pode ser liberada, a depender da mineralogia, da umidade e do poder tampão do solo. Medeiros et al. (2010) compararam extratores de K disponível em solos da Paraíba e reforçaram que as formas solúvel, trocável e não trocável precisam ser consideradas na interpretação da disponibilidade.

O uso exclusivo do K trocável como indicador de disponibilidade pode ser insuficiente em alguns solos. Esse índice é útil e operacional, mas não expressa sozinho a capacidade do solo de repor K durante o ciclo da cultura. Kaminski et al. (2007) avaliaram a depleção de formas de K por cultivos sucessivos em solo com textura superficial arenosa, com e sem histórico de adubação, e indicaram contribuição de formas não trocáveis no suprimento do nutriente.

Tabela 1 – Formas de potássio no solo, função agronômica e fontes de apoio

Forma de K	Localização predominante	Disponibilidade para a planta	Interpretação técnica	Fontes
K em solução	Água do solo	Imediata	Forma absorvida pela raiz; fração pequena e variável	Medeiros et al. (2010)
K trocável	Cargas negativas de argilas e matéria orgânica	Curto prazo	Indicador usado na análise de solo; repõe a solução	Medeiros et al. (2010); Werle et al. (2008)
K não trocável	Intercamadas de minerais 2:1	Médio prazo	Pode suprir K quando a fração trocável sofre depleção	Kaminski et al. (2007); Medeiros et al. (2010)
K estrutural	Rede cristalina de minerais	Longo prazo	Reserva de liberação lenta por intemperismo	Medeiros et al. (2010)
K em resíduos	Palhada e biomassa vegetal	Rápida a moderada	Ciclagem expressiva em plantio direto	Torres e Pereira (2008)

Fonte: elaborada a partir de Medeiros et al. (2010), Kaminski et al. (2007), Werle et al. (2008) e Torres e Pereira (2008).

Transporte, disponibilidade e perdas de K no solo

A disponibilidade de K depende da concentração na solução, da reposição pelo complexo de troca, do teor de água, da difusão, do fluxo de massa e do crescimento radicular. O K^+ chega à raiz por difusão e fluxo de massa, com contribuição definida por umidade, concentração, textura e demanda da planta. Costa et al. (2009) estudaram fluxo difusivo de K em solos sob níveis de umidade e compactação. O trabalho testou oito níveis de umidade, de 10 a 100 %.

A umidade controla a continuidade dos filmes de água entre partículas. Em solo seco, a difusão diminui e a raiz pode não acessar K mesmo quando o teor trocável é adequado. Em solo com excesso de água, o risco de deslocamento vertical aumenta em áreas com baixa CTC (TORRES e PEREIRA, 2008). Portanto, água insuficiente reduz transporte até a raiz, enquanto excesso hídrico pode ampliar perdas em solos suscetíveis.

A lixiviação de K é menor que a de nitrato, pois K^+ é cátion e pode ser retido por cargas negativas. Porém, a perda pode ocorrer em solos arenosos, com baixa CTC, dose alta e chuva intensa. Werle, Garcia e Rosolem (2008) verificaram que o manejo da adubação potássica precisa minimizar perdas e evitar esgotamento do K no solo.

A aplicação de KCl exige cuidado com salinidade. Doses elevadas no sulco podem prejudicar germinação ou crescimento inicial, sobretudo em solo seco, cultura sensível ou baixa distância entre fertilizante e semente. Esse risco não elimina o uso do KCl, mas exige ajuste de dose, posição, época e parcelamento. A recomendação deve associar teor de K, CTC, textura, expectativa de exportação, água e sistema de aplicação (TORRES e PEREIRA, 2008).

A ciclagem por resíduos vegetais é componente decisivo do balanço de K. Torres e Pereira (2008) estudaram plantas de cobertura no Cerrado e registraram que a produção de biomassa, a permanência dos resíduos sobre o solo e sua decomposição interferem na ciclagem de nutrientes. No estudo, milheto, sorgo e crotalária tiveram maior produção de matéria seca; gramíneas acumularam mais K; e milheto, aveia, braquiária e crotalária liberaram K com maior intensidade nos primeiros 42 dias após manejo.

Em plantio direto, a liberação de K da palhada pode concentrar o nutriente nas camadas superficiais (WERLE et al. 2008). Essa concentração pode favorecer culturas com raízes ativas na superfície em períodos úmidos, mas pode limitar absorção sob seca, quando a camada de 0 a 5 cm perde água. Por isso, a interpretação do K em plantio direto deve considerar amostragem estratificada, umidade, palhada e profundidade efetiva de raízes.

Tabela 2 – Processos que controlam disponibilidade e perda de K

Processo	Mecanismo	Efeito agronômico	Fonte
Difusão	Movimento do K^+ da solução até a raiz	Diminui em solo seco ou compactado	Costa et al. (2009)
Fluxo de massa	Transporte com água em direção à raiz	Depende de transpiração e umidade	Costa et al. (2009)
Lixiviação	Deslocamento vertical do K^+	Maior risco em solo arenoso e dose alta	Werle et al. (2008)
Ciclagem por palhada	Liberação de K de resíduos vegetais	Reposição superficial e rápida	Torres e Pereira (2008)
Depleção	Remoção por cultivo sem reposição adequada	Redução de K trocável e uso de K não trocável	Kaminski et al. (2007)

Fonte: elaborada a partir de Costa et al. (2009), Werle et al. (2008), Torres e Pereira (2008) e Kaminski et al. (2007).

Absorção e funções metabólicas do K nas plantas

As plantas absorvem K como K^+. Após a absorção, o nutriente permanece predominantemente na forma iônica e atua como regulador osmótico, ativador enzimático e compensador de cargas. O K participa da fotossíntese, da respiração, da síntese de proteínas, do metabolismo de carboidratos e do transporte de solutos. Como possui mobilidade no floema, pode ser redistribuído entre órgãos fonte e dreno conforme a demanda.

A deficiência de K reduz área foliar, condutância estomática, assimilação de carbono, transporte de açúcares e crescimento de órgãos dreno. Catuchi et al. (2012) avaliaram a interferência da adubação potássica em parâmetros fisiológicos de duas cultivares de soja sob regimes hídricos contrastantes; o experimento foi conduzido em casa de vegetação em Presidente Prudente, SP.

O K participa da manutenção do potencial osmótico celular. Esse papel é essencial para expansão celular, turgor, crescimento de folhas e raízes. Como o crescimento expansivo depende da entrada de água na célula, deficiência de K reduz a capacidade de manter turgor e limita aumento de volume celular. A consequência agronômica é menor crescimento vegetativo, menor interceptação de radiação e menor produção de biomassa.

A relação entre K e balanço de cargas também é decisiva. A absorção de nitrato, a síntese de ácidos orgânicos e o transporte de ânions exigem compensação eletroquímica. O K atua como cátion móvel nessa compensação. Portanto, deficiência de K pode alterar equilíbrio iônico e prejudicar metabolismo de N, transporte de solutos e estabilidade fisiológica.

O K também se relaciona com qualidade de produtos agrícolas. Em culturas produtoras de frutos, tubérculos e grãos, o nutriente influencia enchimento, transporte de açúcares, acúmulo de reservas e resistência a estresses. Esse efeito depende de cultura, cultivar, suprimento hídrico e equilíbrio com cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Excesso de K pode induzir competição com outros cátions, sobretudo em solos com baixa disponibilidade de Ca^{2+} ou Mg^{2+}.

Potássio e transporte de fotoassimilados

O transporte de fotoassimilados ocorre pelo floema, que move açúcares produzidos em folhas fonte para órgãos dreno, como raízes, frutos, sementes, colmos, tubérculos e tecidos jovens. Esse transporte depende de carregamento, manutenção de gradiente osmótico, fluxo de massa e descarregamento no dreno. O K participa desse processo por sua função osmótica e por sua presença no conteúdo floemático.

Dreyer, Gomez-Porras e Riedelsberger (2017) descreveram a “bateria de potássio” em tecidos vasculares. A proposta é que gradientes de K^+ possam energizar processos de transporte por canais semelhantes a AKT2, sem uso direto de ATP em certas etapas.

Esse ponto tem consequência agronômica. Deficiência de K pode limitar não apenas a fotossíntese, mas também a exportação dos produtos da fotossíntese. A folha pode produzir carboidratos, mas o transporte de sacarose para raízes, frutos, grãos ou órgãos de reserva pode ficar restrito. Quando isso ocorre, há acúmulo de açúcares na folha, menor crescimento de drenos e redução do retorno de carbono para raízes.

O transporte floemático depende de pressão gerada por entrada osmótica de água nos elementos crivados. A presença de solutos no floema aumenta a pressão hidrostática e impulsiona o fluxo em direção aos drenos. O K contribui

para esse balanço osmótico e para a neutralização de cargas durante o movimento de solutos. Assim, sua função no floema não é isolada; ela liga osmose, energia, transporte e crescimento.

O equilíbrio fonte-dreno também depende de água. Sob déficit hídrico, o fechamento estomático reduz entrada de CO_2 e produção de assimilados. Ao mesmo tempo, alteração no estado hídrico afeta pressão no floema. Portanto, o papel do K no transporte de fotoassimilados precisa ser interpretado em conjunto com água, área foliar, raiz ativa e demanda dos drenos.

Tabela 3 – Funções do K no transporte de fotoassimilados

Processo	Participação do K	Efeito esperado quando há deficiência	Fonte
Carregamento do floema	Contribui para gradiente osmótico e transporte de sacarose	Menor exportação de açúcares	Dreyer et al. (2017)
Fluxo por pressão	Ajuda a manter balanço osmótico no floema	Menor fluxo fonte-dreno	Dreyer et al. (2017)
Crescimento de drenos	Favorece chegada de fotoassimilados	Menor enchimento de frutos, grãos e raízes	Dreyer et al. (2017); Sardans e Peñuelas (2021)
Fotossíntese	Atua na regulação estomática e enzimática	Menor assimilação de carbono	Sardans e Peñuelas (2021); Catuchi et al. (2012)
Resposta a estresses	Contribui para transporte de água, nutrientes e metabólitos	Menor estabilidade sob seca ou salinidade	Sardans e Peñuelas (2021)

Fonte: elaborada a partir de Dreyer et al. (2017), Sardans e Peñuelas (2021) e Catuchi et al. (2012).

Potássio e relações hídricas das plantas

O K regula relações hídricas por sua contribuição ao potencial osmótico, ao turgor celular e ao movimento estomático. Nas células-guarda, a entrada de K^+ reduz o potencial osmótico, favorece entrada de água e abre o poro estomático. A saída de K^+ promove perda de turgor e fechamento. Esse mecanismo controla troca gasosa e transpiração, com impacto direto na fotossíntese e na eficiência de uso da água.

Sob déficit hídrico, a planta precisa reduzir perda de água sem interromper totalmente a assimilação de CO_2. A homeostase de K participa dessa regulação. Sardans e Peñuelas (2021) relacionaram concentrações adequadas de K^+ à resposta das plantas a seca, salinidade, encharcamento e ataque de herbívoros, por controle de potenciais transmembrana e transporte de água, nutrientes e metabólitos.

Catuchi et al. (2012) avaliaram soja sob regimes hídricos contrastantes e adubação potássica. O trabalho mediu respostas fisiológicas em duas cultivares e testou a interferência da adubação potássica em condições de disponibilidade hídrica contrastante. Esse tipo de estudo ajuda a separar o efeito nutricional do K da resposta fisiológica à água.

Mendes et al. (2013) avaliaram cinco genótipos de Eucalyptus grandis × E. urophylla sob disponibilidade hídrica e adubação potássica. O estudo usou vasos com 7 L de Neossolo Quartzarênico de baixo teor natural de K. Essa evidência mostra que K e água devem ser interpretados em conjunto, sobretudo em espécies lenhosas com alta demanda por crescimento e controle estomático.

A deficiência de K pode reduzir eficiência de uso da água por dois caminhos. Primeiro, limita o controle estomático, com perda de ajuste entre entrada de CO_2 e saída de vapor d'água. Segundo, prejudica crescimento radicular e transporte de fotoassimilados, o que reduz exploração de água e abastecimento de órgãos dreno. Assim, deficiência de K pode intensificar os efeitos da seca mesmo quando o solo contém água em camadas exploráveis.

O manejo hídrico também altera a resposta à adubação potássica. Em solo seco, a difusão de K até a raiz diminui (CATUCHI et al., 2012). Em solo arenoso sob chuva intensa, a perda por lixiviação pode aumentar. Portanto, recomendação de K não deve ser separada do regime de água, sobretudo em sistemas irrigados, solos arenosos ou áreas sujeitas a veranico.

Tabela 4 – Relação entre K, água e resposta fisiológica

Condição	Mecanismo afetado	Consequência fisiológica	Fonte
Déficit hídrico	Menor difusão de K no solo	Menor absorção pela raiz	Costa et al. (2009)
Baixo K na planta	Regulação estomática prejudicada	Menor controle entre CO_2 e transpiração	Sardans e Peñuelas (2021)
K adequado sob restrição hídrica	Melhor ajuste osmótico	Maior estabilidade fisiológica	Catuchi et al. (2012); Mendes et al. (2013)
Solo arenoso com chuva intensa	Lixiviação de K	Menor suprimento no perfil explorado	Werle et al. (2008)
Palhada com alta ciclagem de K	Reposição superficial	Benefício condicionado à umidade superficial	Torres e Pereira (2008)

Fonte: elaborada a partir de Costa et al. (2009), Sardans e Peñuelas (2021), Catuchi et al. (2012), Mendes et al. (2013), Werle et al. (2008) e Torres e Pereira (2008).

Manejo do K em solos tropicais

De acordo com Torres e Pereira (2008), o manejo do K deve partir do diagnóstico químico, mas não pode se limitar ao teor trocável. Textura, CTC, profundidade de raiz, histórico de adubação, cultura, exportação, palhada e regime hídrico precisam entrar na decisão. Em solos arenosos, o parcelamento reduz risco de perda e efeito salino. Em solos argilosos, a retenção tende a ser maior, mas a dinâmica das formas não trocáveis pode alterar a disponibilidade imediata.

A fonte mais usada é o cloreto de potássio, por concentração e custo. Seu uso exige cuidado com salinidade no sulco e com doses elevadas em solo seco. Em culturas sensíveis ao cloro ou sistemas com restrição salina, fontes alternativas podem ser avaliadas, desde que custo, disponibilidade e necessidade agronômica justifiquem a troca (KAMINSKI et al., 2007).

A aplicação a lanço, em cobertura ou no sulco deve ser definida por cultura, solo e risco operacional. No sulco, a proximidade com a raiz favorece acesso inicial, mas aumenta risco salino (COSTA et al., 2009). A lanço, a distribuição é maior, mas pode favorecer acúmulo superficial em plantio direto. Em cobertura, o sincronismo com a demanda melhora quando há chuva ou irrigação suficiente para deslocar K até a zona radicular.

Plantas de cobertura ajudam a reciclar K. Gramíneas e espécies com alta produção de biomassa podem absorver K do perfil e devolvê-lo à superfície por resíduos. Como a liberação do K da palhada pode ser rápida, a cultura seguinte se beneficia quando há sincronia entre liberação, chuva e crescimento radicular. Torres e Pereira (2008) sustentam essa função da biomassa na dinâmica do K em áreas de Cerrado.

O balanço de K deve considerar exportação. Culturas que removem K em grãos, frutos, forragem ou colmos podem reduzir rapidamente o estoque disponível (KAMINSKI et al. (2007). Quando a exportação não é reposta, as formas trocáveis diminuem e a planta passa a depender da liberação de K não trocável. Esse processo pode sustentar a cultura por algum tempo, mas reduz a reserva do sistema.

Esquema 1 – Decisão técnica para manejo do K

Diagnóstico	Risco	Decisão técnica	Base de apoio
Solo arenoso e CTC baixa	Lixiviação	Parcelar K e evitar dose alta no sulco	Werle et al. (2008)
Solo seco no período de aplicação	Baixa difusão	Aplicar com previsão de água ou ajustar época	Costa et al. (2009)
Palhada com alta biomassa	Ciclagem rápida	Sincronizar manejo da cobertura, chuva e demanda da cultura	Torres e Pereira (2008)
K alto na camada superficial	Falha sob seca	Avaliar amostragem estratificada e raiz em profundidade	Torres e Pereira (2008); Costa et al. (2009)
Exportação alta pela colheita	Depleção do estoque	Repor K com base no balanço e na análise de solo	Kaminski et al. (2007); Medeiros et al. (2010)

Fonte: elaborado a partir de Werle et al. (2008), Costa et al. (2009), Torres e Pereira (2008), Kaminski et al. (2007) e Medeiros et al. (2010).

CONCLUSÕES

O K é nutriente de função iônica e osmótica. No solo, sua disponibilidade depende do equilíbrio entre K em solução, K trocável, K não trocável, K estrutural e K reciclado por resíduos vegetais. A fração trocável é o indicador mais usado na rotina, mas o suprimento pode depender de formas não trocáveis, mineralogia e histórico de manejo.

A textura e a CTC controlam retenção e risco de lixiviação. Solos arenosos exigem maior cautela com dose e parcelamento. Solos argilosos podem reter mais K, mas podem apresentar dinâmica dependente de intercamadas minerais. Em plantio direto, resíduos vegetais reciclam K e podem concentrar o nutriente na superfície.

Na planta, o K regula ativação enzimática, turgor, equilíbrio iônico, fotossíntese e transporte de fotoassimilados. Sua presença no floema conecta produção de açúcares nas folhas e crescimento de órgãos dreno. Deficiência de K pode reduzir exportação de sacarose, enchimento de grãos, crescimento de raízes e acúmulo de reservas.

REFERÊNCIAS

CATUCHI, T. A.; GUIDORIZZI, F. V. C.; GUIDORIZI, K. A.; BARBOSA, A. M.; SOUZA, G. M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob regimes hídricos contrastantes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, p. 519-527, 2012.

COSTA, J. P. V. da; BARROS, N. F. de; BASTOS, A. L.; ALBUQUERQUE, A. W. de. Fluxo difusivo de potássio em solos sob níveis de umidade e compactação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 1, p. 56-62, 2009.

DREYER, I.; GOMEZ-PORRAS, J. L.; RIEDELSBERGER, J. The potassium battery: a mobile energy source for transport processes in plant vascular tissues. New Phytologist, v. 216, n. 4, p. 1049-1053, 2017. DOI: 10.1111/nph.14667.

KAMINSKI, J.; BRUNETTO, G.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 1003-1010, 2007.

MEDEIROS, J. S. et al. Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, n. 1, 2010.

MENDES, H. S. J.; PAULA, N. F.; SCARPINATTI, E. A.; PAULA, R. C. Respostas fisiológicas de genótipos de Eucalyptus grandis × E. urophylla à disponibilidade hídrica e adubação potássica. Cerne, v. 19, n. 4, p. 603-611, 2013.

SARDANS, J.; PEÑUELAS, J. Potassium control of plant functions: ecological and agricultural implications. Plants, v. 10, n. 2, article 419, 2021. DOI: 10.3390/plants10020419.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 4, p. 1609-1618, 2008.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2297-2305, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000600009.

CAPÍTULO 4

MAGNÉSIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA NO SOLO, FOTOSSÍNTESE E METABOLISMO ENERGÉTICO VEGETAL

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Lorrany Silva Moraes Amoras; Saymo Justiniano da Silva; Natanael Lucena Ferreira; Lara Oliveira Prestes Lourenço; João Eduardo Pereira Cardoso; Daniele Soares Barroso; João Vitor Sousa Bruni; Felipe Soares Gonçalves; Kelly Kaoanny Pires de Oliveira; Carolina Lagazzi Dreger; Lívia Tálita da Silva Carvalho; Debora Menezes dos Santos; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: O magnésio (Mg) é macronutriente associado à fertilidade do solo, à composição da clorofila, à ativação enzimática, ao transporte de fotoassimilados e ao metabolismo energético das plantas. No solo, ocorre como Mg^{2+} na solução, Mg^{2+} trocável no complexo de troca, Mg em minerais e Mg fornecido por corretivos, como calcário dolomítico, calcítico magnesiano e fontes solúveis. Sua disponibilidade depende do pH, da capacidade de troca de cátions, da textura, da saturação por bases, da relação entre Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+}, da umidade, da lixiviação e do crescimento radicular. Na planta, o Mg ocupa o centro da molécula de clorofila e participa da assimilação de carbono, da síntese e uso de ATP, da ativação de enzimas, da exportação de açúcares e da homeostase energética. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre a dinâmica do Mg no solo, sua participação na fotossíntese e sua função no metabolismo energético vegetal. A análise mostra que o Mg não deve ser tratado apenas como nutriente secundário. Sua deficiência compromete clorofila, fotossíntese, transporte de carboidratos, crescimento radicular e equilíbrio entre fonte e dreno. O manejo exige integração entre análise de solo, correção da acidez, equilíbrio de bases, fonte de Mg, água e demanda fisiológica da cultura.

Palavras-chave: magnésio trocável; calcário dolomítico; clorofila; ATP; fotoassimilados.

INTRODUÇÃO

O magnésio (Mg) ocupa posição estratégica no sistema solo-planta porque conecta fertilidade, fotossíntese e metabolismo energético. No solo, o Mg^{2+} participa do complexo de troca e compõe parte da saturação por bases (AHMED, 2023). Na planta, o nutriente está no centro da molécula de clorofila, atua como

cofator enzimático, estabiliza ribossomos, participa da síntese de proteínas e se associa ao metabolismo do ATP. Revisões recentes destacam o Mg como elemento central para assimilação de CO_2, produção e transporte de carboidratos, ativação enzimática e crescimento vegetal.

A discussão sobre Mg em solos tropicais exige atenção à acidez, à lixiviação e ao equilíbrio entre bases. Segundo Rodrigues Neto (2021), a calagem com calcário dolomítico ou calcítico magnesiano pode elevar pH e fornecer Mg^{2+}, mas a resposta depende da dose, da reatividade do corretivo, da textura, da capacidade de troca de cátions (CTC), da umidade e da distribuição no perfil. A disponibilidade de Mg também pode ser reduzida por desequilíbrio com Ca^{2+} e K^{+}, pois esses cátions competem por sítios de troca e por absorção radicular. Estudos sobre relações Ca/Mg e K/Mg em hortaliças e culturas agrícolas mostram que o equilíbrio entre cátions é necessário para evitar antagonismos nutricionais.

Para Moreira et al., (2015), a deficiência de Mg tem efeito fisiológico rápido porque o nutriente participa da captura de luz e da conversão de energia em compostos orgânicos. Moreira et al. (2015) avaliaram alterações fotossintéticas causadas por Mg e destacaram que o nutriente possui função direta na captura de energia solar e no processo fotoquímico da fotossíntese. Em revisões fisiológicas, Ishfaq et al. (2022) e Ahmed et al. (2023) relacionaram Mg à clorofila, à fixação de carbono, ao transporte de fotoassimilados e à ativação de enzimas ligadas ao crescimento.

De acordo com Ahmed (2023), o Mg também participa do metabolismo energético por sua relação com ATP. Na célula vegetal, parte expressiva do ATP funciona como complexo Mg-ATP, forma bioquimicamente ativa em reações enzimáticas. Kleczkowski e Igamberdiev (2021) discutiram o Mg^{2+} livre como sinal do estado adenilato, ligado ao equilíbrio entre ATP, ADP e AMP. Para Rodrigues Neto (2021), essa relação desloca o Mg de uma função apenas estrutural para uma função regulatória no metabolismo energético.

Este capítulo discute a dinâmica do Mg no solo, sua participação na fotossíntese e seu papel no metabolismo energético das plantas. A hipótese interpretativa é que a eficiência agronômica do Mg depende da integração entre pH, CTC, saturação por bases, equilíbrio Ca-Mg-K, água, raiz, clorofila, exportação de carboidratos e metabolismo de ATP.

DESENVOLVIMENTO

Dinâmica do magnésio no solo

O Mg no solo ocorre na solução, no complexo de troca, em minerais primários e secundários, em resíduos vegetais e em corretivos (MOREIRA, 2015). A forma Mg^{2+} na solução é absorvida pelas raízes. A fração trocável, retida em cargas negativas de argilas e matéria orgânica, repõe a solução conforme a absorção vegetal ou a perda por lixiviação. A fração mineral libera Mg em escala temporal mais longa, por intemperismo (BARBOSA et al., 2019).

De acordo com Moreira (2008), a disponibilidade de Mg depende da CTC, do pH, da textura, da matéria orgânica e da saturação por bases. Em solos ácidos, H^+ e Al^{3+} ocupam parte expressiva do complexo de troca, o que reduz a participação de Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^+. A calagem eleva pH, reduz Al^{3+} e adiciona Ca^{2+} e Mg^{2+} quando o corretivo possui Mg na composição. Viégas (2016) destaca que a mobilidade do Mg no solo como desafio para análise, adubação e absorção radicular sob condições adversas de crescimento.

A textura modifica a retenção do Mg. Solos argilosos e com maior CTC retêm mais Mg^{2+} no complexo de troca (LAVIOLA, 2007). Solos arenosos têm menor capacidade de retenção e maior risco de perda por lixiviação. Esse risco aumenta quando há chuva intensa, baixa CTC, baixa matéria orgânica e doses elevadas de sais solúveis. Portanto, a interpretação do teor de Mg precisa considerar textura e profundidade, não apenas o resultado da camada superficial (BARBOSA et al., 2019).

O Mg possui comportamento mais móvel que o Ca no perfil, embora ambos sejam cátions divalentes. A mobilidade relativa do Mg aumenta em solos com baixa CTC e em ambientes com alta percolação de água (LAVIOLA, 2007). Em sistemas com calagem superficial, a distribuição de Mg em profundidade pode ser limitada pelo tempo de reação, pela dose, pela umidade e pelo movimento de íons. Por isso, deficiências podem ocorrer mesmo após calagem, sobretudo em culturas com alta demanda e raízes concentradas em camadas pouco corrigidas (AHMED, 2023)

A relação entre Mg e outros cátions é crítica. K^+ e Ca^{2+} podem competir com Mg^{2+} no complexo de troca e na absorção pelas raízes. Alta adubação potás-

sica, sem correção do Mg, pode induzir deficiência de Mg em culturas sensíveis (BARBOSA et al., 2019). Em sentido oposto, excesso de Mg pode afetar relações com Ca e K, embora essa condição seja menos comum em solos tropicais intemperizados. A recomendação deve buscar equilíbrio de bases, não elevação isolada de um nutriente.

Tabela 1. Formas e interpretação agronômica do magnésio no solo

Compartimento	Forma predominante	Função agronômica	Limitação técnica
Solução do solo	Mg^{2+}	Forma absorvida pelas raízes	Depende de umidade, raiz ativa e reposição pelo complexo de troca
Complexo de troca	Mg^{2+} trocável	Reserva de curto prazo e componente da saturação por bases	Pode ser reduzido por acidez, lixiviação ou competição com K^{+} e Ca^{2+}
Minerais	Mg estrutural	Reserva de liberação lenta	Baixa contribuição no ciclo curto da cultura
Calcário dolomítico	Carbonatos de Ca e Mg	Corrige acidez e fornece Mg^{2+}	Baixa mobilidade quando aplicado em superfície
Fontes solúveis	Sulfato ou óxidos de Mg	Suprimento mais direto de Mg	Custo, solubilidade e risco de perda dependem do solo

Disponibilidade, calagem e equilíbrio de bases

A calagem é a prática mais comum para corrigir acidez e elevar Ca e Mg em solos agrícolas. O calcário dolomítico fornece Ca e Mg; o calcítico possui menor teor de Mg; materiais magnesianos podem ser usados quando a análise de solo aponta deficiência específica. A escolha do corretivo deve considerar pH, saturação por bases, teor de Mg, relação Ca/Mg, cultura, histórico de manejo e custo (RODRIGUES NETO, 2021).

O equilíbrio entre Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+} deve ser interpretado com cautela. Relações numéricas rígidas podem gerar recomendação inadequada quando o teor absoluto dos nutrientes já está suficiente. Ainda assim, desequilíbrios extremos podem comprometer absorção. Rodrigues Neto et al. (2021) relataram, em estudo com melão rendilhado, a importância da relação Ca/Mg e do

manejo de fontes de K e doses de Ca e Mg para crescimento e produtividade (AHMED, 2023).

A disponibilidade de Mg também se relaciona com fósforo. Moreira et al. (2008) discutiram relação fósforo-magnésio em fertilidade do solo e nutrição de alfafa; o texto registra que Mg pode influenciar absorção de P e desempenho vegetal, embora o efeito dependa do sistema de cultivo. Esse ponto é relevante porque o Mg participa de reações com ATP, e o metabolismo de P depende de formas energéticas associadas ao Mg (LAVIOLA, 2007).

Em culturas perenes, a dinâmica do Mg precisa ser analisada ao longo do desenvolvimento. Laviola et al. (2007) estudaram dinâmica de Ca e Mg em folhas e frutos de cafeeiro e destacaram a necessidade de conhecer períodos de maior exigência nutricional para ajustar manejo. Em café, citros, eucalipto e frutíferas, o balanço entre crescimento vegetativo, frutificação e reserva modifica a demanda por Mg.

Esquema 1. Diagnóstico prático do magnésio no solo

Etapa	Pergunta técnica	Interpretação
1	O pH está baixo?	Corrigir acidez antes de tratar Mg isoladamente
2	O teor de Mg^{2+} trocável está baixo?	Escolher corretivo ou fertilizante com Mg
3	Há excesso de K^{+} no manejo?	Avaliar antagonismo K-Mg
4	O solo é arenoso ou tem baixa CTC?	Avaliar parcelamento e risco de lixiviação
5	A cultura tem alta demanda por fotoassimilados?	Priorizar suprimento de Mg no período de maior crescimento

Absorção, transporte e redistribuição do magnésio

As plantas absorvem Mg como Mg^{2+}. Após a absorção, o nutriente se move pelo xilema e pelo floema, com mobilidade interna maior que a do Ca. Por isso, sintomas de deficiência de Mg tendem a aparecer primeiro em folhas mais velhas, pois a planta redistribui o nutriente para tecidos jovens e regiões de maior demanda metabólica (KLECZKOWSKI, L. A. e IGAMBERDIEV, 2021).

A absorção de Mg depende da concentração na solução do solo, da raiz ativa, da umidade e da competição com outros cátions. Altas concentrações de K^+ e NH_4^+ podem reduzir absorção de Mg^{2+} (ISHFAQ, 2021). Esse antagonismo explica por que áreas com adubação potássica intensa podem manifestar deficiência de Mg, mesmo sem teor extremamente baixo no solo. A análise foliar ajuda a separar deficiência real, desequilíbrio de cátions e limitação radicular.

O transporte de Mg para folhas é necessário para sustentar clorofila, enzimas e exportação de carboidratos. Como o Mg é móvel no floema, a planta consegue deslocá-lo de folhas velhas para folhas novas, mas essa redistribuição tem custo fisiológico: folhas velhas perdem clorofila, reduzem fotossíntese e passam a contribuir menos para o suprimento de carboidratos (KLECZKOWSKI, L. A. e IGAMBERDIEV, 2021).

A deficiência de Mg altera partição de açúcares. Barbosa et al. (2019) avaliaram deficiência de Mg e partição de açúcares em plantas lenhosas, com discussão sobre efeitos no crescimento e na distribuição de biomassa entre raiz e parte aérea. Revisões fisiológicas também relacionam deficiência de Mg à menor exportação de fotoassimilados e ao acúmulo de carboidratos em folhas.

Magnésio e fotossíntese

A participação do Mg na fotossíntese começa na clorofila. O átomo de Mg ocupa a posição central do anel porfirínico, que permite absorção de luz nos complexos fotossintéticos. Quando há deficiência, a síntese de clorofila diminui, a coloração verde perde intensidade e a fotossíntese é comprometida. Ishfaq et al. (2022) descrevem o Mg como componente central dos pigmentos de clorofila e elemento ligado à assimilação fotossintética de CO_2.

O Mg também atua em etapas posteriores à captura de luz. Ele participa da ativação de enzimas no cloroplasto e contribui para a fixação de carbono. Moreira et al. (2015) estudaram alterações fotossintéticas induzidas por Mg e relacionaram o nutriente à captura de energia e ao processo fotoquímico. Ahmed et al. (2023) destacam que Mg catalisa processos associados à síntese de ATP, fixação de CO_2 e produção de carboidratos.

A deficiência de Mg pode reduzir fotossíntese por três vias. A primeira é estrutural, pela menor formação de clorofila (KLECZKOWSKI, L. A. e IGAM-

BERDIEV, 2021). A segunda é bioquímica, pela menor ativação enzimática no cloroplasto. A terceira é funcional, pelo prejuízo na exportação de sacarose das folhas. Quando a exportação é limitada, carboidratos podem se acumular na folha, o que retroalimenta negativamente a fotossíntese e reduz crescimento de drenos (ISHFAQ, 2021).

Tabela 2. Funções do Mg na fotossíntese e efeitos da deficiência

Função do Mg	Local ou processo	Efeito da deficiência
Componente da clorofila	Complexos coletores de luz	Clorose internerval e menor absorção de luz
Ativação enzimática	Cloroplastos	Menor assimilação de CO_2
Relação com ATP	Fotofosforilação e metabolismo energético	Menor eficiência de reações dependentes de energia
Transporte de açúcares	Floema	Acúmulo de carboidratos nas folhas e menor crescimento de drenos
Equilíbrio fonte-dreno	Folhas, raízes, frutos e grãos	Menor produção de biomassa e rendimento

Magnésio e metabolismo energético

O Mg é indispensável ao metabolismo energético porque grande parte das reações com ATP usa o complexo Mg-ATP, não ATP livre. Esse complexo participa de fosforilações, ativação enzimática, transporte de íons, síntese de macromoléculas e manutenção da homeostase celular (KLECZKOWSKI, L. A. e IGAMBERDIEV, 2021). Sem Mg adequado, a célula pode ter ATP, mas parte das reações dependentes de ATP perde eficiência.

Kleczkowski e Igamberdiev (2021) propuseram que o Mg^{2+} livre atua como sinal do estado adenilato celular, ligado ao equilíbrio entre ATP, ADP e AMP. Esse conceito é importante porque aproxima Mg de regulação metabólica: o nutriente não é apenas cofator passivo, mas parte do controle do estado energético.

O Mg também estabiliza ribossomos e participa da síntese de proteínas. Ahmed et al. (2023) destacam que Mg^{2+} apoia síntese proteica, replicação de DNA e uso de ATP nas células. Esse papel explica por que a deficiência afeta crescimento antes mesmo de sintomas visuais severos. A planta perde eficiência metabólica, reduz expansão foliar e compromete produção de biomassa.

A relação entre Mg e carboidratos é central. Sob deficiência, a exportação de sacarose das folhas para raízes, frutos ou grãos pode ser prejudicada. Isso reduz crescimento radicular, diminui absorção de água e nutrientes e agrava a limitação nutricional. Portanto, a deficiência de Mg pode criar ciclo negativo: menor transporte de fotoassimilados reduz raiz; raiz menor absorve menos Mg; a limitação se intensifica.

Esquema 2. Papel do Mg no metabolismo energético vegetal

Etapa	Participação do Mg	Consequência fisiológica
1	Composição da clorofila	Captura de luz
2	Formação de Mg-ATP	Uso metabólico da energia
3	Ativação de enzimas	Fixação de carbono e síntese de compostos
4	Transporte de sacarose	Abastecimento de raízes, frutos e grãos
5	Síntese de proteínas	Crescimento e manutenção celular

Manejo do magnésio em sistemas agrícolas

O manejo do Mg deve começar pela análise de solo. pH, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, CTC, saturação por bases, saturação por Al e textura são variáveis centrais (ISH-FAQ, 2021). Quando o pH está baixo e o Mg também está baixo, o calcário dolomítico pode corrigir acidez e fornecer Mg. Quando o pH já está adequado, mas o Mg é insuficiente, fontes específicas de Mg podem ser avaliadas, conforme custo, solubilidade e cultura.

Para Barbosa (2012), a calagem precisa ser planejada com o equilíbrio entre Ca e Mg. O uso repetido de calcário calcítico em área com Mg baixo pode corrigir acidez e manter deficiência de Mg. O uso de calcário dolomítico sem necessidade de Mg pode elevar demais a participação desse cátion no complexo de troca. A escolha do corretivo deve responder ao diagnóstico, não ao hábito regional.

O manejo de K deve ser revisado quando há deficiência de Mg. Doses altas de KCl, em solos de baixa CTC ou sob alta exportação, podem intensificar antagonismo K-Mg. Nesses casos, a solução não é apenas elevar Mg; é ajustar dose, fonte, parcelamento e equilíbrio de bases.

Para Ishfaq (2021), a água também interfere no suprimento de Mg. Em solo seco, o transporte até a raiz diminui. Em solo arenoso sob chuva intensa, o risco de perda aumenta. Por isso, irrigação, cobertura do solo e sistema radicular devem entrar na decisão. Em culturas de alta demanda energética, como café, citros, soja, milho, algodão e frutíferas, deficiência de Mg tende a afetar folhas, produção de fotoassimilados e enchimento de drenos. Aplicações foliares de Mg podem corrigir deficiência em curto prazo, sobretudo quando há limitação temporária de absorção radicular. Porém, não substituem correção do solo quando o problema é teor baixo, acidez, lixiviação ou antagonismo de cátions. O manejo eficiente combina correção do solo, fonte adequada, equilíbrio com K e Ca, raiz ativa e monitoramento foliar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Mg possui função dupla no sistema solo-planta. No solo, participa da saturação por bases e depende do equilíbrio entre pH, CTC, textura, lixiviação e competição com Ca^{2+} e K^{+}. Na planta, integra a clorofila, ativa enzimas, participa do metabolismo de ATP, contribui para transporte de fotoassimilados e sustenta crescimento.

A disponibilidade de Mg não deve ser interpretada apenas pelo teor trocável. É necessário avaliar pH, relação com Ca e K, textura, profundidade, histórico de calagem e adubação potássica. Solos arenosos, sistemas com alta lixiviação e áreas com uso intenso de K exigem atenção específica.

A participação do Mg na fotossíntese é direta. O nutriente compõe a clorofila, contribui para captura de luz, assimilação de carbono e produção de carboidratos. Deficiência de Mg reduz a eficiência da folha como órgão fonte e prejudica crescimento de raízes, frutos, grãos e órgãos de reserva.

No metabolismo energético, o Mg atua por meio do complexo Mg-ATP e da regulação do estado adenilato. Essa função mostra que o nutriente não deve ser tratado como secundário. Ele participa da base bioquímica do crescimento vegetal.

O manejo moderno do Mg deve integrar correção da acidez, equilíbrio de bases, fonte adequada, água, raiz, fotossíntese e demanda de drenos. Sem essa integração, a correção química do solo pode não se traduzir em eficiência fisiológica da planta.

REFERÊNCIAS

AHMED, N. et al. The power of magnesium: unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. Frontiers in Plant Science, 2023.

BARBOSA, R. P. et al. The effects of magnesium deficiency on sugar partitioning and growth of plants. Ciência Florestal, 2019.

GUELFI, D. R. et al. Monoammonium phosphate coated with polymers and magnesium for coffee plants. Ciência e Agrotecnologia, 2018.

ISHFAQ, M. et al. Physiological essence of magnesium in plants and its widespread deficiency in the farming system of China. Frontiers in Plant Science, 2022.

KLECZKOWSKI, L. A.; IGAMBERDIEV, A. U. Magnesium signaling in plants. International Journal of Molecular Sciences, v. 22, n. 3, article 1159, 2021.

LAVIOLA, B. G. et al. Dinâmica de cálcio e magnésio em folhas e frutos de cafeeiro arábico. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

MOREIRA, A. et al. Relação fósforo e magnésio na fertilidade do solo, no estado nutricional e na produção da alfafa. Revista Brasileira de Zootecnia, 2008.

MOREIRA, W. R. et al. Magnesium-induced alterations in the photosynthetic performance and antioxidant metabolism of coffee plants. Scientia Agricola, 2015.

RODRIGUES NETO, J. et al. Potassium sources and calcium and magnesium doses in melon crop. Horticultura Brasileira, 2021.

CAPÍTULO 5

ENXOFRE: SÍNTESE DE PROTEÍNAS, METABOLISMO, FONTES E MANEJO DA ADUBAÇÃO

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Karen Nascimento Campos; Alane Oliveira da Silva; Natanael Lucena Ferreira; Daiane Antonello Taetti; Ana Júlia Souza de Oliveira; Hanrara Pires de Oliveira; Carlos Giliard Lima; José Epitácio dos Santos Neto; Weslley Alves Gonçalves; Dioclea Almeida Seabra Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Alasse Oliveira da Silva

Resumo: O enxofre (S) é macronutriente requerido pelas plantas para síntese de aminoácidos sulfurados, proteínas, coenzimas, vitaminas, glutationa, compostos de defesa e metabólitos secundários. A forma absorvida pelas raízes é o sulfato (SO_4^{2-}), que passa por transporte, ativação, redução e assimilação até formar cisteína, ponto de entrada do S reduzido no metabolismo vegetal. A partir da cisteína, a planta forma metionina, glutationa, proteínas e compostos específicos de cada cultura. No solo, o S ocorre em formas orgânicas e inorgânicas; parcela expressiva do estoque está ligada à matéria orgânica, enquanto o sulfato na solução é a fração de acesso direto às raízes e de maior risco de lixiviação. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre síntese de proteínas, metabolismo, fontes e manejo da adubação sulfurada. A análise mostra que o manejo do S deve ser integrado ao nitrogênio (N), à matéria orgânica, ao teor de sulfato, à textura, à chuva, à irrigação, à cultura e à exportação pela colheita. A adubação sulfurada deve responder ao diagnóstico do solo e da planta, não à aplicação por calendário.

Palavras-chave: sulfato; cisteína; metionina; glutationa; adubação sulfurada.

INTRODUÇÃO

O S participa de processos metabólicos que ligam nutrição mineral, síntese de proteínas, qualidade de grãos e resposta a estresses. Sua função não se limita ao suprimento de sulfato para crescimento vegetativo. O nutriente compõe cisteína, metionina, glutationa, coenzimas, vitaminas e compostos de defesa. Narayan et al. (2023) descreveram o S como componente de aminoácidos, ligações dissulfeto, vitaminas e cofatores, com efeito sobre crescimento e desenvolvimento vegetal.

A relação entre S e N é central para a síntese proteica. O N fornece o esqueleto nitrogenado dos aminoácidos, enquanto o S participa da formação de cisteína e metionina. Jobe et al. (2019) destacaram que a cisteína é produto inicial da assimilação de sulfato e ponto de convergência entre metabolismo de carbono, nitrato e sulfato. Essa integração explica por que a deficiência de S pode limitar o aproveitamento do N e reduzir qualidade proteica.

A adubação sulfurada ganhou peso técnico porque fontes concentradas de N, fósforo (P) e potássio (K) podem conter pouco S. Além disso, sistemas de alta produtividade exportam mais nutrientes e podem reduzir o retorno de S por resíduos. Scherer (2001) associou deficiência de S a mudanças no uso de fertilizantes, matéria orgânica, produtividade e deposição atmosférica. Lucheta e Lambais (2012) também trataram o S como elemento ligado à agricultura, ao ciclo no solo e à necessidade de manejo compatível com sistemas produtivos.

No solo, o S apresenta dinâmica distinta da de P e K. A fração orgânica representa parcela expressiva do estoque total, mas depende de mineralização para virar sulfato. A forma sulfato é absorvida pelas plantas e pode ser perdida por lixiviação em solos arenosos, sob chuva intensa ou irrigação mal ajustada. Scherer (2001) registrou que mais de 95 % do S do solo pode estar em forma orgânica, com liberação dependente de processos biológicos.

Este capítulo discute o S na síntese de proteínas, no metabolismo vegetal, nas fontes fertilizantes e no manejo da adubação. A hipótese interpretativa é que a eficiência do S depende da integração entre sulfato disponível, mineralização da matéria orgânica, demanda da cultura, manejo do N, textura, água, fonte e época de aplicação.

DESENVOLVIMENTO

Enxofre e síntese de proteínas

A síntese de proteínas depende de aminoácidos. O S entra nesse processo por meio de cisteína e metionina. A cisteína contém grupo tiol, participa de ligações dissulfeto e atua como precursor de moléculas sulfuradas (SCHERER,

2001). A metionina participa da iniciação da síntese proteica e de processos metabólicos ligados à metilação. Sem suprimento adequado de S, a planta pode apresentar limitação na formação de proteínas mesmo com N disponível (NARAYAN et al, 2021).

Nesse sentido, a cisteína é ponto metabólico decisivo. Jobe et al. (2019) destacaram que ela representa o primeiro produto da assimilação de sulfato e fonte de S reduzido para o metabolismo vegetal. Esse ponto conecta assimilação de sulfato, assimilação de nitrato e metabolismo de carbono. Davidian e Kopriva (2010) reforçaram que a absorção e a assimilação de sulfato são reguladas por mecanismos coordenados, mas não idênticos, o que mostra que a entrada do sulfato e sua conversão metabólica precisam ser avaliadas como etapas próprias.

A deficiência de S altera quantidade e composição de proteínas. Zhao, Hawkesford e McGrath (1999) revisaram a assimilação de S e seus efeitos sobre rendimento e qualidade de trigo, com ênfase na sensibilidade do crescimento reprodutivo e na qualidade de grãos sob limitação de S. Em culturas produtoras de grãos, esse efeito interessa porque qualidade industrial, teor proteico e composição de aminoácidos podem responder ao balanço N-S.

A interação N-S aparece com clareza em oleaginosas. Fismes et al. (2000) estudaram a influência do S sobre eficiência aparente de uso de N, rendimento e qualidade de colza (*Brassica napus* L.) em solo calcário. Poisson et al. (2019) avaliaram componentes de rendimento e qualidade de sementes de colza sob adubação sulfurada e interação com adubação nitrogenada. Esses trabalhos sustentam que o S não deve ser manejado como nutriente isolado quando a cultura tem demanda proteica ou alto suprimento de N.

A relação N-S deve ser interpretada por diagnóstico. Aplicar N sem S em área com baixa disponibilidade de sulfato pode aumentar crescimento vegetativo inicial, mas limitar síntese proteica e qualidade (NARAYAN et al, 2021). Aplicar S sem corrigir falta de N também não resolve o problema. O objetivo técnico é sincronizar suprimento de N e S com crescimento vegetativo, formação de órgãos reprodutivos e demanda por proteínas.

Tabela 2. Participação do S na síntese de proteínas

Processo	Participação do S	Consequência da deficiência	Fontes
Formação de cisteína	Entrada de S reduzido no metabolismo	Menor síntese de compostos sulfurados	Jobe et al. (2019); Narayan et al. (2023)
Formação de metionina	Aminoácido sulfurado ligado à síntese proteica	Alteração na composição de proteínas	Zhao, Hawkesford e McGrath (1999); Narayan et al. (2023)
Regulação do sulfato	Controle da absorção e da assimilação	Baixa conversão de sulfato em S orgânico	Davidian e Kopriva (2010); Kopriva et al. (2015)
Relação N-S	Integração entre aminoácidos nitrogenados e sulfurados	Menor eficiência do N	Jobe et al. (2019); Fismes et al. (2000)
Qualidade de grãos e sementes	Composição proteica e tecnológica	Redução de qualidade em culturas sensíveis	Zhao, Hawkesford e McGrath (1999); Poisson et al. (2019)

Fonte: elaborada a partir das fontes citadas na tabela.

Metabolismo do enxofre na planta

As plantas absorvem S, em maior parte, como sulfato (SO_4^{2-}). Após absorção, o sulfato pode ser transportado pelo xilema, armazenado em vacúolos ou assimilado em tecidos metabolicamente ativos. Scherer (2001) descreveu a absorção radicular de sulfato e sua redução assimilatória, com participação de tecidos verdes na assimilação do S.

A assimilação do sulfato exige ativação e redução. O sulfato é ativado a adenosina 5'-fosfossulfato (APS) e depois segue para redução até sulfeto, que entra na síntese de cisteína. Kopriva et al. (2015) destacaram que as vias de absorção e assimilação do S foram estudadas em detalhe e que a regulação do metabolismo sulfúrico envolve genes, enzimas e integração metabólica.

A absorção de sulfato não basta para garantir resposta fisiológica. Davidian e Kopriva (2010) discutiram a regulação da absorção e da assimilação de sulfato e indicaram que esses processos não devem ser tratados como uma única etapa. A planta pode absorver sulfato, armazená-lo ou converter o nutriente em compostos reduzidos, conforme estado nutricional, metabolismo de N e disponibilidade de carbono (NARAYAN et al, 2021).

O metabolismo do S não atua isolado. Ele depende de carbono, energia e N. A síntese de cisteína exige esqueleto de carbono, N reduzido e sulfeto. Por isso, plantas sob limitação de luz, N, água ou energia podem não converter S absorvido em compostos orgânicos com eficiência. Jobe et al. (2019) analisaram essa integração entre sulfato, nitrato e carbono, com foco na coordenação entre vias de metabolismo primário.

A glutationa é uma das moléculas sulfuradas de maior função fisiológica. Ela participa do estado redox celular, da resposta a estresses e da detoxificação de compostos reativos. Portanto, deficiência de S pode afetar tanto crescimento quanto proteção contra estresses. Narayan et al. (2023) relacionaram S a crescimento, desenvolvimento e respostas fisiológicas ligadas a compostos sulfurados.

Dinâmica do enxofre no solo

O S do solo ocorre em formas orgânicas e inorgânicas. A forma orgânica está ligada à matéria orgânica, resíduos vegetais e biomassa microbiana (LUCHETA e LAMBAIS, 2012). A forma inorgânica de maior interesse agronômico é o sulfato na solução do solo, pois é absorvido pelas raízes. Scherer (2001) indicou que mais de 95 % do S do solo pode estar em formas orgânicas, enquanto o sulfato representa a fração de acesso direto às plantas.

A mineralização da matéria orgânica transforma formas orgânicas de S em sulfato. Esse processo depende de microrganismos, umidade, temperatura, aeração, relação carbono/enxofre e qualidade dos resíduos. Lucheta e Lambais (2012) trataram o S na agricultura com ênfase na ciclagem e na participação do solo como compartimento que controla disponibilidade para as culturas. Em solos com baixa matéria orgânica, pouca palhada ou baixa atividade biológica, o fornecimento natural de S pode ser insuficiente durante fases de alta demanda.

O sulfato possui maior mobilidade que fosfato, pois permanece como ânion na solução do solo e pode ser lixiviado. O risco aumenta em solos arenosos, com baixa retenção, chuva intensa ou irrigação mal ajustada. Scherer (2001) tratou a lixiviação como processo capaz de contribuir para depleção de S, com resistência dependente de fatores como textura, argila e óxidos de ferro e alumínio.

A diagnose do S no solo é mais complexa que a de alguns cátions. O teor de sulfato varia no perfil e no tempo (LUCHETA e LAMBAIS, 2012). Amostragens apenas superficiais podem subestimar ou superestimar o suprimento real. A análise foliar e o histórico da área ajudam a interpretar a resposta, sobretudo em culturas exigentes ou em solos com alto risco de perda.

Tabela 3. Formas e processos do S no sistema solo-planta

Compartimento	Forma ou processo	Interpretação agronômica	Fontes
Solução do solo	SO_4^{2-}	Forma absorvida pela raiz; sujeita à lixiviação	Scherer (2001); Narayan et al. (2023)
Matéria orgânica	S orgânico	Reserva dependente de mineralização	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)
Resíduos vegetais	S em tecidos	Retorno condicionado por decomposição	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)
Planta	Cisteína e metionina	Síntese proteica e metabolismo primário	Jobe et al. (2019); Zhao, Hawkesford e McGrath (1999)
Metabolismo redox	Glutationa	Defesa e equilíbrio celular	Kopriva et al. (2015); Narayan et al. (2023)

Fonte: elaborada a partir das fontes citadas na tabela.

Fontes de enxofre

Para Jobe et al., (2019), as fontes de S podem ser divididas em fontes de sulfato, fontes elementares e fontes organominerais ou orgânicas. Fontes de sulfato fornecem S em forma prontamente disponível, como sulfato de amônio, sulfato de potássio, sulfato de magnésio e gesso agrícola. Elas são úteis quando há necessidade de resposta rápida ou quando o ciclo da cultura é curto.

O sulfato de amônio fornece N e S. A fonte pode ser útil quando a cultura demanda ambos os nutrientes. O manejo precisa considerar acidificação, dose de N e risco de salinidade no sulco. O sulfato de potássio fornece K e S, com uso em sistemas nos quais se deseja evitar cloreto ou suprir K junto ao S. O sulfato de magnésio fornece magnésio (Mg) e S, com uso dependente do diagnóstico de ambos os nutrientes.

O gesso agrícola fornece cálcio (Ca) e S como sulfato. Seu uso deve ser decidido por análise de solo e objetivo agronômico. Segundo Jobe et al., (2019),

ele não substitui calcário para correção da acidez, mas pode fornecer sulfato e Ca em profundidade. Quando o objetivo é S, deve-se calcular a dose pelo teor de S e pela necessidade da cultura, não apenas pelo efeito do Ca.

O S elementar precisa ser oxidado por microrganismos para virar sulfato. Por isso, sua resposta é mais lenta e depende de tamanho de partícula, umidade, temperatura, aeração e atividade microbiana. Essa fonte pode ser útil em planejamento de médio prazo, mas não deve ser usada como única opção quando a cultura precisa de S de forma imediata (KOPRIVA et al., 2015).

Fontes orgânicas e resíduos culturais podem contribuir para o suprimento, mas a liberação depende da mineralização. Esterco, compostos, palhada e resíduos agroindustriais devem ser interpretados por análise química e por dinâmica de decomposição. O S orgânico não deve ser contado como disponível de modo instantâneo.

Tabela 4. Fontes de S e critérios de uso

Fonte	Nutrientes fornecidos	Velocidade esperada de disponibilidade	Uso técnico	Base
Sulfato de amônio	N e S	Rápida	Suprimento conjunto de N e S	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)
Sulfato de potássio	K e S	Rápida	K sem cloreto e suprimento de S	Scherer (2001)
Sulfato de magnésio	Mg e S	Rápida	Correção conjunta de Mg e S	Scherer (2001)
Gesso agrícola	Ca e S	Rápida a moderada	S e Ca, com atenção ao perfil do solo	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)
S elementar	S	Lenta, após oxidação	Planejamento com antecedência	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)
Fontes orgânicas	S e outros nutrientes	Variável	Suprimento dependente de mineralização	Scherer (2001); Lucheta e Lambais (2012)

Fonte: elaborada a partir das fontes citadas na tabela.

Manejo da adubação sulfurada

O manejo do S deve começar pelo diagnóstico. Análise de solo, análise foliar, histórico de produtividade, textura, matéria orgânica, exportação e cultura devem orientar a decisão. Em culturas exigentes ou em sistemas de alta produtividade, a demanda por S pode crescer junto com a demanda por N. Scherer (2001) recomendou que doses de S considerem S disponível no solo e exigência da cultura para alcançar alto rendimento e reduzir lixiviação.

A textura é critério central. Solos arenosos retêm menos sulfato e apresentam maior risco de perda. Nesses casos, parcelamento ou escolha de fonte com liberação menos imediata pode reduzir risco (KOPRIVA et al., 2015). Solos argilosos, com óxidos e maior capacidade de adsorção de sulfato, podem reter mais S, mas isso não elimina necessidade de diagnóstico.

A época de aplicação deve acompanhar a demanda da cultura. Em culturas anuais, o S precisa estar disponível no crescimento vegetativo e no período de formação de proteínas. Em trigo, Zhao, Hawkesford e McGrath (1999) discutiram efeitos da assimilação de S sobre rendimento e qualidade, o que liga manejo de S à fase de formação de grãos.

O manejo deve integrar S e N. A deficiência de S pode reduzir o aproveitamento do N porque limita formação de aminoácidos sulfurados e proteínas. Fismes et al. (2000) mostraram relação entre S, eficiência aparente de uso de N, rendimento e qualidade em colza. Poisson et al. (2019) reforçaram essa interação ao avaliar componentes de rendimento e qualidade de sementes sob adubação sulfurada e nitrogenada. Portanto, elevar dose de N em área limitada por S pode aumentar custo sem elevar qualidade ou produção na mesma proporção.

A escolha da fonte depende da urgência e do nutriente associado. Se há falta de S e N, sulfato de amônio pode ser coerente (KOPRIVA et al., 2015). Se há demanda por K sem cloreto, sulfato de potássio pode ser opção. Se há falta de Mg e S, sulfato de magnésio tem lógica técnica. Se o objetivo é Ca e S em profundidade, gesso pode ser avaliado. Se o objetivo é acidificação gradual ou liberação lenta de S, S elementar pode ser usado, desde que haja tempo para oxidação.

Esquema 1. Decisão técnica para adubação sulfurada

Pergunta	Interpretação	Decisão
A cultura exige alto S?	Grãos, oleaginosas, leguminosas e brássicas demandam atenção	Ajustar diagnóstico e dose
O solo tem baixo sulfato?	Alto risco de deficiência	Aplicar fonte sulfatada
A matéria orgânica é baixa?	Menor reserva de S orgânico	Não depender apenas da mineralização
O solo é arenoso?	Alto risco de lixiviação	Parcelar ou ajustar época
Há alta adubação nitrogenada?	Demanda de S para proteína aumenta	Integrar N e S
A fonte fornece outro nutriente?	N, K, Mg ou Ca alteram a decisão	Escolher fonte pelo conjunto de nutrientes

Fonte: elaborado a partir de Scherer (2001), Lucheta e Lambais (2012), Zhao, Hawkesford e McGrath (1999), Narayan et al. (2023), Jobe et al. (2019), Fismes et al. (2000) e Poisson et al. (2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O S é macronutriente exigido para síntese de proteínas, metabolismo primário, glutationa, coenzimas e compostos de defesa. Sua importância agronômica decorre da ligação direta com cisteína, metionina, qualidade de grãos, aproveitamento de N e crescimento vegetal.

A forma absorvida pela planta é o sulfato. No solo, porém, parcela expressiva do S está em formas orgânicas, cuja liberação depende de mineralização. Essa dinâmica exige atenção à matéria orgânica, à umidade, à textura e à atividade microbiana.

A deficiência de S pode limitar o uso do N. Por isso, a adubação nitrogenada deve ser planejada junto ao suprimento de S, sobretudo em culturas com alta demanda proteica ou alto rendimento esperado. Resultados em trigo e colza indicam que o balanço N-S afeta rendimento, eficiência de uso de N e qualidade de grãos ou sementes.

As fontes de S não são equivalentes. Sulfatos oferecem resposta mais rápida. S elementar exige oxidação antes da absorção. Gesso, sulfato de amônio, sulfato de potássio e sulfato de magnésio devem ser escolhidos conforme diagnóstico do S e do nutriente associado.

O manejo correto da adubação sulfurada exige diagnóstico, fonte adequada, época, dose, textura, risco de lixiviação, matéria orgânica, cultura e exportação. A adubação por calendário é tecnicamente fraca. A decisão deve responder ao sistema solo-planta.

REFERÊNCIAS

DAVIDIAN, J. C.; KOPRIVA, S. Regulation of sulfate uptake and assimilation: the same or not the same? *Molecular Plant*, v. 3, n. 2, p. 314-325, 2010. DOI: 10.1093/mp/ssq001.

FISMES, J.; VONG, P. C.; GUEUDRÉ, C.; FROSSARD, E. Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy*, v. 12, n. 2, p. 127-141, 2000. DOI: 10.1016/S1161-0301(99)00052-0.

JOBE, T. O.; ZENZEN, I.; RAHIMZADEH KARVANSARA, P.; KOPRIVA, S. Integration of sulfate assimilation with carbon and nitrogen metabolism in transition from C3 to C4 photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*, v. 70, n. 16, p. 4211-4221, 2019. DOI: 10.1093/jxb/erz250.

KOPRIVA, S.; CALDERWOOD, A.; WECKOPP, S. C.; KOPRIVOVA, A. Plant sulfur and Big Data. *Plant Science*, v. 241, p. 1-10, 2015. DOI: 10.1016/j.plantsci.2015.09.014.

LUCHETA, A. R.; LAMBAIS, M. R. Sulfur in agriculture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 5, p. 1369-1379, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500001.

NARAYAN, O. P.; KUMAR, P.; YADAV, B.; DUA, M.; JOHRI, A. K. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, v. 18, n. 1, article 2030082, 2023. DOI: 10.1080/15592324.2022.2030082.

POISSON, E.; TROUVERIE, J.; BRUNEL-MUGUET, S.; AKMOUCHE, Y.; PONTET, C.; PINOCHET, X.; AVICE, J. C. Seed yield components and seed quality of oilseed rape are impacted by sulfur fertilization and its interactions with nitrogen fertilization. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, article 458, 2019. DOI: 10.3389/fpls.2019.00458.

SCHERER, H. W. Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy*, v. 14, n. 2, p. 81-111, 2001. DOI: 10.1016/S1161-0301(00)00082-4.

ZHAO, F. J.; HAWKESFORD, M. J.; McGRATH, S. P. Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, v. 30, p. 1-17, 1999. DOI: 10.1006/jcrs.1998.0241.

CAPÍTULO 6

CÁLCIO NO SISTEMA SOLO-PLANTA: DINÂMICA, CORREÇÃO DA ACIDEZ E FORMAÇÃO DOS TECIDOS VEGETAIS

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Lorrany Silva Moraes Amoras; Alane Oliveira da Silva; Dimas Luiz da Silva Cappovila; Natanael Lucena Ferreira; Lara Oliveira Prestes Lourenço; Daniele Soares Barroso; Damiana Roberta dos Santos Alvelino; Andrey de Souza Ferazin; Lívia Tálita da Silva Carvalho; Emanuel Moraes de Souza; Dioclea Almeida Seabra Silva; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes

Resumo: O cálcio (Ca) é macronutriente associado à correção da acidez do solo, à redução da toxicidade por alumínio, ao crescimento radicular, à estabilidade de membranas, à sinalização celular e à formação da parede celular. No solo, o Ca ocorre na solução, no complexo de troca, em minerais, em corretivos e em sais de maior mobilidade, como o sulfato de cálcio. Sua disponibilidade depende do pH, da saturação por bases, da capacidade de troca de cátions, da textura, da presença de alumínio, da umidade, do crescimento radicular e da estratégia de correção da acidez. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre a dinâmica do Ca no sistema solo-planta, a calagem, o uso de gesso agrícola, o transporte do Ca na planta e sua função na formação de tecidos vegetais. A análise mostra que o Ca não deve ser tratado apenas como componente do calcário. O nutriente participa da estrutura da lamela média, da ligação entre pectinas, da integridade de membranas e da sinalização celular. Por apresentar baixa redistribuição pelo floema, sua deficiência ocorre com maior chance em tecidos jovens, folhas novas, ápices e frutos com baixa transpiração. O manejo do Ca exige integração entre análise de solo, correção da acidez, fornecimento em profundidade, água, crescimento radicular e demanda dos órgãos em formação.

Palavras-chave: calagem; gesso agrícola; saturação por bases; parede celular; pectina.

INTRODUÇÃO

O cálcio (Ca) ocupa posição estratégica no sistema solo-planta, pois atua na química do solo e na formação dos tecidos vegetais. No solo, o Ca participa da saturação por bases, reduz a atividade do alumínio (Al^{3+}) tóxico e melhora o ambiente químico para crescimento radicular (FARIA et al., 2003). Na planta, o Ca

estabiliza membranas, compõe a parede celular, atua na lamela média e participa de sinais celulares mediados por Ca^{2+}. Essa dupla função exige que o nutriente seja discutido como elemento de fertilidade, agente associado à correção da acidez e componente estrutural da planta.

A acidez do solo limita a produtividade em solos tropicais por reduzir a disponibilidade de bases, aumentar a atividade de Al^{3+} e restringir o crescimento das raízes. A calagem eleva o pH, aumenta Ca^{2+} e magnésio (Mg^{2+}) no complexo de troca e reduz Al^{3+} na camada corrigida. Caires et al. (2004) avaliaram alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e ao gesso em plantio direto, em Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, em Ponta Grossa, PR. Faria et al. (2003), em estudo com tomate e melão, registraram aumento de pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} e redução de Al^{3+} após calagem e gessagem.

A calagem, porém, possui baixa mobilidade quando aplicada na superfície, sobretudo em sistemas sem revolvimento. Por isso, a correção da acidez em profundidade pode ser limitada (TUTEJA, 2007). O gesso agrícola, composto por sulfato de cálcio, não neutraliza a acidez como o calcário, mas fornece Ca^{2+} acompanhado de sulfato, o que favorece deslocamento de Ca para camadas subsuperficiais e redução da saturação por Al em profundidade. Caires et al. (2011) avaliaram aplicação superficial de gesso em Latossolo sob plantio direto e estudaram seus efeitos em atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de milho e trigo.

Na planta, o Ca difere de nutrientes móveis, como nitrogênio e potássio. Após a absorção, seu transporte se associa ao fluxo transpiratório pelo xilema. A redistribuição pelo floema é baixa, o que torna tecidos novos e frutos pouco transpirantes mais sensíveis à deficiência. Hanger (1979) revisou o movimento de Ca em plantas e descreveu o fluxo predominantemente ascendente do nutriente, com baixa redistribuição por tubos crivados. Hocking et al. (2016) relacionaram transporte de Ca, fisiologia de frutos, parede celular, membranas e desordens fisiológicas.

A função estrutural do Ca está associada à ligação entre pectinas na parede celular e na lamela média. O Ca^{2+} forma pontes entre grupos carboxílicos de pectinas, o que contribui para adesão celular, firmeza de tecidos e integridade de frutos. Daher e Braybrook (2015) revisaram a função da pectina na adesão e

separação celular e descreveram a lamela média rica em pectina como mediadora física desses processos. Thor (2019) tratou o Ca como nutriente e mensageiro, com função na estabilidade de parede celular, membranas e transdução de sinais.

Este capítulo discute a dinâmica do Ca no sistema solo-planta, com foco em correção da acidez, fornecimento em superfície e subsuperfície, transporte na planta e formação de tecidos vegetais. A hipótese interpretativa é que o desempenho agronômico do Ca depende da integração entre pH, Al^{3+}, saturação por bases, água, raiz, xilema e demanda dos tecidos em crescimento.

DESENVOLVIMENTO

Dinâmica do cálcio no solo

Para Caires et al. (2003), o Ca no solo ocorre na solução, no complexo de troca, em minerais, em resíduos, em corretivos e em sais de solubilidade contrastante. A forma Ca^{2+} na solução é absorvida pelas raízes. A fração trocável, retida em cargas negativas de argilas e matéria orgânica, repõe a solução conforme a absorção vegetal ou a perda por lixiviação. A fração mineral participa do suprimento em escala mais lenta, por intemperismo.

A disponibilidade de Ca depende da capacidade de troca de cátions (CTC), do pH, da saturação por bases, da textura, da matéria orgânica e da presença de cátions concorrentes. Em solos ácidos, a baixa saturação por bases reduz a participação de Ca^{2+} no complexo de troca, enquanto Al^{3+} e H^{+} passam a ocupar maior proporção das cargas (CASTRO et al., 2015). A correção da acidez aumenta a presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} e reduz Al^{3+} na camada atingida pelo corretivo, como mostram estudos com calagem e gessagem em solos brasileiros.

De acordo com Caires et al. (2011), a textura modifica retenção e mobilidade de Ca. Solos argilosos e com maior CTC tendem a reter mais Ca^{2+} no complexo de troca. Solos arenosos possuem menor capacidade de retenção e maior risco de perda, sobretudo sob chuva intensa. O Ca é mais retido que ânions móveis, mas pode se deslocar no perfil quando associado a sulfato ou quando o solo possui baixa CTC.

A relação entre Ca, Al e raiz é decisiva. O Al^{3+} restringe alongamento radicular, reduz exploração de água e nutrientes e limita o volume de solo explorado.

Ao elevar pH e reduzir Al^{3+}, a calagem melhora o ambiente químico. Quando o problema ocorre em subsuperfície, o gesso pode fornecer Ca^{2+} em profundidade e reduzir efeitos do Al^{3+} por formação de pares iônicos e deslocamento de sulfato. Caires et al. (2003) avaliaram calcário e gesso aplicados na superfície em sistema sem preparo e trataram alterações químicas do solo, nutrição mineral e produção de soja.

Tabela 1. Formas e funções do cálcio no sistema solo-planta

Compartimento	Forma predominante	Função agronômica	Limitação técnica
Solução do solo	Ca^{2+}	Forma absorvida pelas raízes	Depende de umidade, raiz ativa e reposição pelo complexo de troca
Complexo de troca	Ca^{2+} trocável	Reserva de curto prazo; eleva saturação por bases	Pode ser baixo em solos ácidos ou arenosos
Calcário	Carbonatos de Ca e Mg	Eleva pH, reduz Al^{3+} e fornece Ca^{2+} e Mg^{2+}	Possui baixa mobilidade quando aplicado na superfície
Gesso agrícola	Sulfato de cálcio	Fornece Ca^{2+} em profundidade e acompanha sulfato	Não substitui calagem para neutralização da acidez
Planta	Ca^{2+} estrutural e sinalizador	Parede celular, membranas, tecidos jovens e sinalização	Possui baixa redistribuição pelo floema

Correção da acidez: calagem e gesso agrícola

A calagem é a prática clássica para correção da acidez do solo. O calcário neutraliza H^+ e Al^{3+}, eleva pH, aumenta saturação por bases e fornece Ca^{2+} e Mg^{2+}, quando o material é dolomítico. A resposta das culturas depende da dose, do poder relativo de neutralização total, da granulometria, da distribuição, da incorporação ou permanência em superfície, do tempo de reação e da umidade do solo (FERNANDES, 2025).

Em plantio direto, a aplicação superficial de calcário corrige com maior intensidade a camada superior, pois o corretivo possui baixa mobilidade. Nicolodi et al. (2008) avaliaram indicadores de acidez para recomendação de calagem em plantio direto e concluíram que as camadas de 0 a 10 cm ou 0 a 20 cm podem ser usadas para avaliação, conforme o critério adotado. Castro et al. (2015) avaliaram aplicação superficial de calcário dolomítico e silicato de cálcio e magnésio

em sistema tropical de plantio direto, com análise de atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de soja e milho.

O gesso agrícola possui função distinta. Ele fornece Ca^{2+} e sulfato, com maior mobilidade que o calcário. O gesso não eleva o pH de modo equivalente ao calcário, mas pode aumentar Ca^{2+} em subsuperfície e reduzir a saturação por Al. Essa função tem valor em solos com acidez subsuperficial, pois raízes mais profundas ampliam acesso à água e nutrientes em períodos secos. Caires et al. (2011) avaliaram aplicação superficial de gesso em Latossolo sob plantio direto durante três anos, com milho e trigo.

A escolha entre calcário, gesso ou uso combinado depende do diagnóstico. Quando o problema é acidez superficial, baixa saturação por bases e pH baixo, o calcário é a ferramenta central (FERNANDES, 2025). Quando a limitação está em subsuperfície, com Al^{3+} elevado e Ca baixo, o gesso pode complementar a calagem. Usar gesso sem corrigir acidez superficial é erro técnico, pois o gesso não substitui o poder neutralizante do calcário.

Esquema 1. Decisão técnica para correção com cálcio

Etapa	Diagnóstico	Decisão
1	pH baixo e baixa saturação por bases na camada superficial	Aplicar calcário conforme recomendação regional
2	Ca baixo ou Al^{3+} alto em subsuperfície	Avaliar gesso agrícola como complemento
3	Raiz restrita em profundidade	Corrigir ambiente químico e físico do perfil
4	Veranico ou alta demanda hídrica	Priorizar raiz profunda e suprimento de Ca no perfil
5	Desequilíbrio entre Ca, Mg e K	Ajustar corretivo e adubação para equilíbrio de bases

A calagem também pode alterar disponibilidade de outros nutrientes. O aumento de pH reduz toxicidade por Al e manganês (Mn), melhora atividade microbiana e modifica disponibilidade de fósforo e micronutrientes. Doses excessivas podem reduzir disponibilidade de alguns micronutrientes e alterar equilíbrio entre Ca, Mg e K. Por isso, a correção deve seguir análise de solo, saturação por bases desejada e exigência da cultura. A resposta produtiva à calagem depende da severidade da acidez, do teor inicial de Ca e Mg, da cultura, da chuva após

aplicação, da incorporação e da limitação dominante do sistema. Para Hocking et al. (2016), em solos já corrigidos, a aplicação adicional pode não gerar resposta. Em solos com Al^{3+} alto e baixa saturação por bases, a resposta tende a ser maior, pois a correção remove limitação química primária ao crescimento radicular.

Absorção e transporte do cálcio na planta

De acordo com Shin et al. (2021), as plantas absorvem Ca como Ca^{2+} e a absorção ocorre nas raízes, por vias apoplásticas e simplásticas. Após a entrada, o Ca se move com maior dependência do fluxo transpiratório no xilema. Por isso, folhas com alta transpiração costumam receber mais Ca que frutos ou tecidos com baixa transpiração. Essa característica explica a ocorrência de deficiência localizada mesmo quando o teor de Ca no solo parece adequado.

O Ca possui baixa mobilidade no floema. Hanger (1979) descreveu movimento predominantemente ascendente do Ca, das raízes para meristemas e tecidos jovens, com baixa redistribuição pelo floema. Essa baixa redistribuição diferencia o Ca de nutrientes móveis, como K e N. Sintomas de deficiência aparecem em tecidos novos, meristemas, folhas jovens, frutos e pontas de crescimento, pois esses órgãos dependem de suprimento contínuo via xilema.

A água controla parte do transporte do Ca. Quando a transpiração diminui por déficit hídrico, umidade excessiva, baixa radiação, alta umidade relativa ou fechamento estomático, o fluxo de Ca para tecidos dependentes do xilema pode cair. Frutos, por possuírem menor transpiração relativa, são sensíveis a falhas no suprimento. Hocking et al. (2016) revisaram a fisiologia do Ca em frutos e relacionaram acúmulo e distribuição de Ca à entrega de água e às interações com parede celular no apoplasto.

A podridão apical em tomate e pimentão é exemplo clássico de deficiência localizada de Ca em frutos. Essa desordem não significa, necessariamente, ausência de Ca no solo; pode resultar de falha no transporte para o fruto, crescimento rápido, oscilação hídrica, salinidade, excesso de amônio, competição iônica ou baixa transpiração do órgão. De Freitas et al. (2013) estudaram partição e alocação de Ca em tomateiro e relacionaram distribuição de Ca, estresse hídrico e suscetibilidade à podridão apical.

Tabela 2. Mobilidade do cálcio e implicações para diagnóstico

Situação	Efeito sobre Ca na planta	Implicação prática
Baixa transpiração do fruto	Menor fluxo de Ca via xilema	Pode ocorrer desordem localizada mesmo com solo corrigido
Déficit hídrico	Menor transporte de Ca por fluxo transpiratório	Irrigação irregular aumenta risco em tecidos novos
Crescimento rápido	Demanda local supera chegada de Ca	Frutos e folhas novas ficam mais vulneráveis
Excesso de sais	Competição iônica e menor absorção de água	Pode reduzir fluxo de Ca para órgãos dreno
Baixa mobilidade no floema	Pouca redistribuição interna	Pulverização foliar tem efeito localizado

Cálcio, parede celular e formação de tecidos vegetais

A parede celular vegetal determina forma, resistência, crescimento e adesão entre células. O Ca participa dessa estrutura por sua interação com pectinas, sobretudo na lamela média. Cadeias de pectina com grupos carboxílicos livres podem se ligar ao Ca^{2+}, com formação de pontes que aumentam coesão entre células. Shin et al. (2021) revisaram funções da pectina em redes de sinalização e na arquitetura da parede celular, com atenção às modificações de pectina durante o desenvolvimento vegetal.

A lamela média, rica em pectina, é essencial para adesão celular. Daher e Braybrook (2015) revisaram a função da pectina na adesão e separação celular e destacaram que a lamela média rica em pectina atua como mediadora física desses processos. Quando há deficiência de Ca, a adesão entre células pode diminuir, e tecidos jovens podem apresentar menor integridade estrutural.

A firmeza de frutos também depende da integridade da parede celular e da lamela média. Hocking et al. (2016) apontaram que o Ca influencia propriedades físicas de frutos, suscetibilidade a doenças, relações hídricas, membranas e parede celular por ligações com pectinas desesterificadas. Esse efeito explica a associação entre Ca e qualidade pós-colheita em frutos, embora a resposta dependa de espécie, cultivar, estádio de desenvolvimento e transporte efetivo de Ca ao órgão.

O Ca também estabiliza membranas. A deficiência aumenta permeabilidade e fragilidade celular, o que pode intensificar vazamento de solutos e desordens

fisiológicas. Em tecidos de crescimento rápido, a necessidade de Ca é contínua porque o nutriente se fixa em paredes e membranas com baixa redistribuição posterior. Isso reforça a necessidade de suprimento regular durante a formação dos tecidos (FERNANDES, 2025).

Esquema 2. Função estrutural do Ca na formação dos tecidos

Etapa	Processo	Resultado fisiológico
1	Absorção de Ca^{2+} pela raiz	Entrada do nutriente no xilema
2	Transporte com fluxo de água	Chegada a folhas novas, ápices e frutos
3	Ligação com pectinas	Maior adesão celular na lamela média
4	Estabilização de membranas	Menor vazamento de solutos
5	Formação de tecidos firmes	Menor risco de desordens fisiológicas

O papel do Ca não se restringe à estrutura. O Ca^{2+} citosólico atua como sinal em resposta a estímulos internos e externos. A célula mantém baixa concentração de Ca^{2+} livre no citosol e usa aumentos transitórios como sinais. Tuteja e Mahajan (2007) revisaram a rede de sinalização por Ca em plantas, com descrição de transportadores, Ca^{2+}-ATPases, antiportes H^{+}/Ca^{2+}, assinaturas de Ca e proteínas ligantes de Ca. Thor (2019) descreveu o Ca como nutriente e mensageiro, com função estrutural e informacional.

Manejo do cálcio em sistemas agrícolas

O manejo do Ca deve começar pela análise de solo. pH, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, H+Al, saturação por bases, saturação por Al, CTC e profundidade de amostragem são variáveis centrais. A recomendação de calcário deve considerar necessidade de correção da acidez, exigência da cultura, poder relativo de neutralização total e presença de Mg no corretivo (DAHER e BRAYBROOK, 2015). Quando a limitação ocorre abaixo da camada corrigida, a avaliação de subsuperfície é necessária para decidir sobre gesso.

Para Castro et al., (2015), a calagem deve ser planejada como correção química, não apenas como fornecimento de Ca. O objetivo é elevar pH e saturação por bases e reduzir Al^{3+}. O fornecimento de Ca é consequência agronômica, mas

não substitui a função corretiva. Em sistemas com baixa saturação por bases e Al^{3+} elevado, a calagem aumenta ambiente radicular favorável e pode ampliar absorção de água e nutriente e o gesso deve ser tratado como condicionador químico de subsuperfície. Seu uso é mais coerente quando há Ca baixo ou Al^{3+} elevado em profundidade. Aplicado sem diagnóstico, pode gerar custo sem retorno. Associado à calagem, pode favorecer crescimento radicular em camadas mais profundas, com maior estabilidade em períodos secos.

O manejo do Ca na planta exige atenção à água. Como o transporte depende do xilema, irrigação irregular, alta salinidade, crescimento vegetativo excessivo, baixa transpiração de frutos e competição iônica podem gerar deficiência localizada (FARIAS, et al., 2015). Nesses casos, aplicar mais Ca ao solo nem sempre resolve o problema se o transporte até o órgão afetado continuar limitado

Aplicações foliares de Ca possuem efeito restrito. Como o nutriente tem baixa mobilidade no floema, a aplicação foliar tende a atuar no tecido atingido pela calda, com menor redistribuição para frutos ou novos órgãos. Em culturas com frutos sensíveis, a pulverização pode ajudar quando atinge diretamente o órgão-alvo, mas não substitui manejo de solo, água e crescimento (DE FREITAS et al., 2015). O equilíbrio com outros cátions também precisa ser observado. Excesso de Ca pode reduzir absorção de Mg ou K por competição no complexo de troca e na absorção radicular. Do mesmo modo, excesso de K ou amônio (NH_4^+) pode reduzir absorção de Ca. A recomendação deve buscar equilíbrio entre bases, e não elevação isolada de um nutriente.

CONCLUSÕES

O Ca possui função dupla no sistema solo-planta. No solo, participa da correção da acidez, da saturação por bases e da redução da toxicidade por Al^{3+}. Na planta, estabiliza membranas, compõe a parede celular, atua na lamela média e participa da sinalização celular.

A calagem é a prática central para corrigir acidez e fornecer Ca^{2+} na camada corrigida. O gesso agrícola complementa a calagem quando há limitação em subsuperfície, pois fornece Ca^{2+} com maior mobilidade no perfil, mas não substitui a neutralização da acidez pelo calcário.

A disponibilidade de Ca no solo não garante suprimento adequado aos tecidos em formação. O transporte depende do fluxo de água pelo xilema, e a redistribuição pelo floema é baixa. Por isso, folhas novas, meristemas e frutos com baixa transpiração são mais sensíveis à deficiência.

A formação de tecidos vegetais depende do Ca por sua ligação com pectinas na lamela média, por sua contribuição à firmeza da parede celular e por sua função na integridade de membranas. A deficiência reduz estabilidade estrutural e aumenta risco de desordens fisiológicas em órgãos jovens e frutos.

O manejo moderno do Ca deve integrar solo, água, raiz e tecido vegetal. A decisão técnica precisa considerar pH, Al^{3+}, saturação por bases, Ca em profundidade, gesso, calagem, irrigação, crescimento radicular, competição iônica e demanda dos órgãos em formação. Sem essa integração, a correção do solo pode não se traduzir em suprimento adequado aos tecidos que mais dependem de Ca.

REFERÊNCIAS

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of gypsum in low acidic Oxisol under no-till cropping system. Scientia Agricola, v. 68, n. 2, p. 209-216, 2011.

CASTRO, G. S. A. et al. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in a tropical no-tillage system. Bragantia, 2015.

DAHER, F. B.; BRAYBROOK, S. A. How to let go: pectin and plant cell adhesion. Frontiers in Plant Science, v. 6, article 523, 2015.

DE FREITAS, S. T. et al. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. Journal of Experimental Botany, 2013.

FARIA, C. M. B.; COSTA, N. D.; FARIA, A. F. Ação de calcário e gesso sobre características químicas do solo e na produtividade e qualidade do tomate e melão. Horticultura Brasileira, v. 21, n. 4, p. 615-619, 2003.

FERREIRA, João Gabriel. Corretivo de acidez do solo combinado com o uso de gesso agrícola. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

HANGER, B. C. The movement of calcium in plants. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 10, n. 1-2, p. 171-193, 1979.

HOCKING, B. et al. Fruit calcium: transport and physiology. Frontiers in Plant Science, v. 7, article 569, 2016.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para recomendação de calagem no sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 237-247, 2008.

SHIN, Y. et al. Recent advances in understanding the roles of pectin as an active participant in plant signaling networks. Plants, v. 10, n. 8, article 1712, 2021.

THOR, K. Calcium—nutrient and messenger. Frontiers in Plant Science, v. 10, article 440, 2019.

TUTEJA, N.; MAHAJAN, S. Calcium signaling network in plants: an overview. Plant Signaling & Behavior, v. 2, n. 2, p. 79-85, 2007.

CAPÍTULO 7

USO E MANEJO CORRETO DE FERTILIZANTES MODERNOS: FERTILIZANTES DE EFICIÊNCIA AUMENTADA, TECNOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE APLICAÇÃO

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; João Gustavo Ferreira Casseb; Aline Nazaré Habib Guedes; Vivyan Justi Conceição; Tiago dos Santos Cabral; Julia Clara Martim; Miryan de Souza Militão; Jaqueline da silva lima; Ana Clara Souza de Oliveira; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: Fertilizantes modernos foram desenvolvidos para aumentar a eficiência de uso dos nutrientes, reduzir perdas e ajustar a liberação à demanda das culturas. Entre essas tecnologias estão fertilizantes de liberação lenta, fertilizantes de liberação controlada, fertilizantes estabilizados com inibidores de urease ou nitrificação, fontes revestidas, produtos com polímeros, fertilizantes organominerais, formulações fluidas, aplicações localizadas, fertirrigação e nanofertilizantes. O uso correto exige diagnóstico de solo e planta, escolha de fonte compatível com o ambiente, dose ajustada à meta produtiva, localização adequada, época de aplicação e avaliação do risco de volatilização, lixiviação, desnitrificação, fixação, salinidade e antagonismo entre nutrientes. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre fertilizantes de eficiência aumentada, tecnologias disponíveis e estratégias de aplicação. A análise mostra que tecnologia não compensa erro de diagnóstico. Fertilizantes modernos ampliam eficiência quando são usados para resolver um mecanismo de perda ou de baixa disponibilidade identificado no sistema. Sem esse critério, elevam custo e podem manter a limitação agronômica.

Palavras-chave: eficiência de uso de nutrientes; ureia estabilizada; inibidor de urease; liberação controlada; manejo 4C.

INTRODUÇÃO

A intensificação agrícola aumentou a dependência de fertilizantes minerais e orgânicos. Essa dependência elevou produtividade, mas também expôs perdas de nutrientes por volatilização, lixiviação, desnitrificação, escorrimento superficial, fixação no solo e baixa sincronia entre aplicação e demanda da cultura (OLIVEIRA et al, 2019). Fertilizante moderno não deve ser entendido como pro-

duto mais caro ou mais novo. Deve ser entendido como tecnologia capaz de reduzir uma perda conhecida, melhorar liberação, aumentar aproveitamento ou viabilizar manejo mais preciso.

De acordo com Frazão et al., (2014), o conceito de fertilizante de eficiência aumentada reúne produtos desenhados para melhorar o aproveitamento do nutriente em relação a fontes convencionais. Trenkel (2010) organizou esse grupo em fertilizantes de liberação lenta, liberação controlada e fertilizantes estabilizados, com discussão de inibidores de nitrificação e urease. A lógica técnica é reduzir a diferença entre nutriente aplicado e nutriente efetivamente absorvido pela cultura.

A eficiência de uso de nutrientes depende de fonte, dose, época e local de aplicação, mas também de solo, clima, cultura, água, palhada, pH, textura e atividade biológica (SILVA et al., 2014). A tecnologia só funciona quando coincide com o mecanismo limitante. Ureia com inibidor de urease pode ser útil quando a perda por amônia é provável. Fertilizante de liberação controlada pode ser útil quando há risco de perda ou demanda prolongada. Fertirrigação pode ser eficiente quando água e nutriente são aplicados com controle. Nenhuma dessas estratégias corrige solo ácido, compactação, diagnóstico errado ou deficiência de outro nutriente.

O nitrogênio (N) é o nutriente mais associado às tecnologias de eficiência aumentada porque apresenta perdas por volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e emissão de óxido nitroso. Akiyama, Yan e Yagi (2010), avaliaram fertilizantes de eficiência aumentada como opções para mitigar emissões de N_2O e NO em solos agrícolas. Cantarella et al. (2018) revisaram o uso de NBPT como inibidor de urease e relataram redução média de 53 % nas perdas de NH_3 em comparação à ureia sem inibidor, com ganho médio de produtividade de 6,0 %, embora a resposta varie entre culturas e condições de aplicação.

As tecnologias de liberação controlada e revestimento também avançaram. Azeem et al. (2014) revisaram materiais e métodos para produção de ureia revestida de liberação controlada, com foco em revestimentos e cinética de liberação. Timilsena et al. (2015) revisaram formulações e padrões de liberação de fertilizantes de eficiência aumentada, com destaque para encapsulamento e materiais

poliméricos. Essas tecnologias exigem compatibilidade entre curva de liberação, cultura, temperatura, umidade, solo e janela de demanda.

Este capítulo discute uso e manejo correto de fertilizantes modernos, com foco em fertilizantes de eficiência aumentada, tecnologias e estratégias de aplicação. A hipótese interpretativa é que fertilizantes modernos são ferramentas de manejo, não garantia de resposta. Sua eficiência depende de diagnóstico, ambiente, mecanismo de perda, sincronia com demanda e execução correta no campo.

DESENVOLVIMENTO

Fertilizantes de eficiência aumentada

Fertilizantes de eficiência aumentada são produtos que modificam a disponibilidade do nutriente no tempo ou no espaço, reduzem perdas ou melhoram sincronia entre fornecimento e demanda. Eles não formam grupo único (FRAZÃO et al., 2014). Incluem fertilizantes estabilizados, com inibidores de urease ou nitrificação; fertilizantes de liberação lenta; fertilizantes de liberação controlada; fontes revestidas; materiais encapsulados; e formulações com aditivos.

Fertilizantes estabilizados reduzem a velocidade de transformação do nutriente no solo. A ureia com inibidor de urease retarda a hidrólise da ureia, reduzindo formação rápida de amônio e elevação localizada de pH que favorece volatilização de NH_3 (GUELFI, 2017). O efeito é mais útil quando a ureia é aplicada em superfície, com palhada, temperatura adequada à atividade da urease, umidade oscilante e ausência de incorporação.

Inibidores de nitrificação reduzem temporariamente a conversão de amônio em nitrato. Esse atraso pode reduzir lixiviação de NO_3^- e emissões associadas à desnitrificação, desde que o solo e o clima favoreçam esses processos (SILVA et al., 2014). A tecnologia tem menor sentido técnico quando a perda por nitrato é improvável ou quando o sistema exige rápida disponibilidade de N nítrico.

De acordo com Guelfi (2017), fertilizantes de liberação lenta dependem da dissolução ou decomposição gradual do material. Fertilizantes de liberação controlada usam revestimentos ou barreiras físicas que regulam a entrada de água e a saída do nutriente. A diferença prática está no grau de controle da liberação. Em

produtos revestidos, temperatura, umidade, espessura e integridade do revestimento afetam a curva de liberação.

A decisão de uso precisa começar pelo mecanismo de perda. Se a principal perda é volatilização, o foco pode ser inibidor de urease, incorporação, chuva após aplicação ou fonte alternativa. Se o risco é lixiviação, o foco pode ser parcelamento, inibidor de nitrificação, fonte de liberação controlada ou ajuste de irrigação (MORO et al., 2013). Se o problema é fixação de fósforo (P), a solução não é inibidor de urease; exige localização, fonte fosfatada, correção do solo e manejo da rizosfera.

Tabela 2. Tipos de fertilizantes modernos e uso técnico

Tipo	Mecanismo	Situação de maior utilidade	Risco de uso inadequado	Fontes
Ureia com inibidor de urease	Retarda hidrólise da ureia	Ureia em superfície com risco de volatilização	Custo sem retorno se a ureia for incorporada ou chover logo após aplicação	Cantarella et al. (2018)
Fertilizante com inibidor de nitrificação	Retarda formação de nitrato	Solo úmido, risco de lixiviação ou desnitrificação	Baixa resposta se a perda por nitrato for pequena	Akiyama, Yan e Yagi (2010); Trenkel (2010)
Liberação controlada	Revestimento regula saída do nutriente	Culturas com demanda prolongada ou alto risco de perda	Liberação incompatível com pico de demanda	Azeem et al. (2014); Timilsena et al. (2015)
Liberação lenta	Baixa solubilidade ou degradação gradual	Sistemas com menor frequência de aplicação	Deficiência inicial se liberação for lenta demais	Trenkel (2010)
Nanofertilizantes	Partículas ou carreadores nanoestruturados	Entrega dirigida e liberação modulada em produtos validados	Risco ambiental e falta de validação local	Dimkpa e Bindraban (2018)
Fertirrigação	Nutriente aplicado com água	Sistemas irrigados com controle operacional	Distribuição desigual se irrigação for mal calibrada	Trenkel (2010); Timilsena et al. (2015)

Fonte: elaborada a partir de Trenkel (2010), Akiyama, Yan e Yagi (2010), Cantarella et al. (2018), Azeem et al. (2014), Timilsena et al. (2015) e Dimkpa e Bindraban (2018).

Tecnologias associadas aos fertilizantes modernos

A tecnologia de inibição de urease tem aplicação direta no manejo da ureia. A ureia é fonte concentrada e usada em sistemas agrícolas, mas sua aplicação superficial pode gerar perda de N por volatilização de NH_3. O NBPT é o inibidor de urease mais estudado e difundido. Cantarella et al. (2018) relataram redução média de 53 % na volatilização de NH_3 em relação à ureia sem inibidor, com resposta produtiva média de 6,0 %, mas com variação entre culturas e condições de aplicação.

A tecnologia de inibição de nitrificação atua em outra etapa do ciclo do N. O objetivo é manter parte do N na forma amoniacal por mais tempo, reduzindo transformação rápida em nitrato. Akiyama, Yan e Yagi (2010) avaliaram fertilizantes de eficiência aumentada como estratégia de mitigação de N_2O e NO em solos agrícolas. A resposta depende do ambiente, pois a emissão de N_2O exige condições de umidade, N disponível, carbono e atividade microbiana.

Os fertilizantes revestidos de liberação controlada funcionam por barreira física. A água entra no grânulo, dissolve o nutriente e a solução sai de modo regulado pelo revestimento. Azeem et al. (2014) revisaram métodos de produção de ureia revestida de liberação controlada e discutiram materiais, mecanismos e ensaios de liberação. A aplicação correta exige conhecer a duração da liberação e compará-la com a curva de absorção da cultura.

Formulações poliméricas e encapsuladas buscam regular liberação e reduzir contato imediato do nutriente com o solo. Timilsena et al. (2015) revisaram formulações de fertilizantes de eficiência aumentada e padrões de liberação de nutrientes, com destaque para encapsulamento e materiais poliméricos. O desafio técnico é evitar que a liberação ocorra tarde demais, cedo demais ou em ritmo incompatível com a demanda.

Chien, Prochnow e Cantarella (2009) discutiram desenvolvimentos na produção e uso de fertilizantes para melhorar eficiência nutricional e reduzir impactos ambientais, com foco em nutrientes como N, P e enxofre (S). Essa fonte reforça que a tecnologia deve ser interpretada dentro de um sistema de manejo, e não como propriedade isolada do fertilizante.

Nanofertilizantes são proposta recente baseada em partículas ou carreadores em escala nanométrica. Dimkpa e Bindraban (2018) discutiram nanofertilizantes como produtos potenciais para a indústria, com oportunidades e incertezas. A adoção agronômica deve exigir registro, composição conhecida, segurança ambiental, ensaio de campo e comparação econômica com fontes convencionais.

Fertilizantes fluidos e fertirrigação não são, por si, fertilizantes de eficiência aumentada, mas podem elevar eficiência por aplicação precisa (MORO et al., 2013). A vantagem está em parcelar nutrientes, ajustar dose ao desenvolvimento da cultura e distribuir com água. A fragilidade é operacional: sistema desuniforme entrega nutriente desuniforme. Portanto, fertirrigação exige calibração hidráulica, análise da água, compatibilidade de produtos e prevenção de precipitados.

Estratégias de aplicação

A estratégia correta segue o princípio fonte, dose, local e época adequados (MORO et al., 2013). A fonte deve responder ao problema identificado. A dose deve ser calculada por análise de solo, expectativa de produtividade, exportação, histórico da área e eficiência esperada. O local deve aproximar nutriente da raiz e reduzir perdas. A época deve sincronizar disponibilidade com demanda.

Para N, o manejo deve reduzir volatilização, lixiviação e desnitrificação. Em ureia aplicada a lanço, a presença de palhada, ausência de chuva, temperatura alta e pH superficial elevado aumentam risco de volatilização (MENEZES, 2015). Nessas condições, ureia com NBPT, incorporação, aplicação antes de chuva ou uso de fonte menos suscetível podem ser avaliados. Em solos sujeitos à lixiviação, parcelamento e inibidor de nitrificação podem ter utilidade.

Para P, a tecnologia deve enfrentar baixa mobilidade e retenção no solo. Aplicação localizada próxima à raiz pode aumentar eficiência em solos com alta capacidade de adsorção. Fertilizantes fosfatados revestidos ou com aditivos só fazem sentido quando há evidência de melhor aproveitamento no solo e cultura de interesse (PEREIRA, 2009). O erro é aplicar produto “tecnológico” sem corrigir acidez, sem posicionamento adequado e sem avaliar teor de P disponível.

Para potássio (K), o manejo moderno está menos ligado a inibidores e mais ligado a fonte, dose, parcelamento, textura e exportação. Solos arenosos e de

baixa capacidade de troca exigem cautela com dose única elevada (COSTA et al., 2009). Em culturas com alta remoção, o balanço de exportação deve orientar reposição. Fontes com cloro podem ser adequadas para várias culturas, mas precisam de avaliação em espécies sensíveis ou ambientes salinos.

Para cálcio (Ca), magnésio (Mg) e S, a estratégia depende da função no solo e na planta. Ca e Mg muitas vezes entram por corretivos de acidez (GUARÇONI, 2017). O uso de calcário, gesso ou fontes solúveis precisa ser definido por análise de solo, profundidade, saturação por bases e presença de Al^{3+}. O S, por estar em forma sulfato em várias fontes, exige atenção à lixiviação e à demanda da cultura.

Esquema 1. Decisão técnica para escolha de fertilizante moderno

Pergunta	Interpretação	Decisão
Qual nutriente limita a cultura?	Diagnóstico por solo, folha e histórico	Não escolher tecnologia antes do diagnóstico
Qual perda predomina?	Volatilização, lixiviação, desnitrificação, fixação ou escorrimento	Selecionar tecnologia compatível com a perda
A cultura demanda nutriente por longo período?	Curva de absorção e formação de drenos	Avaliar liberação controlada ou parcelamento
O solo retém ou perde o nutriente?	Textura, CTC, pH, matéria orgânica e umidade	Ajustar fonte, dose e localização
A tecnologia paga o custo?	Ganho produtivo, redução de perda e operacionalidade	Comparar com fonte convencional bem manejada
Há validação local?	Ensaio em solo e cultura semelhantes	Testar em faixa antes de adoção total

Fonte: elaborado a partir de Trenkel (2010), Cantarella et al. (2018), Akiyama, Yan e Yagi (2010), Azeem et al. (2014) e Timilsena et al. (2015).

Boas práticas de manejo

De acordo com Vasconcelos (2014), a primeira boa prática é não comprar tecnologia sem diagnóstico. Fertilizantes modernos devem responder a uma limitação definida. Se a área tem acidez, compactação, deficiência de água ou baixa população de plantas, a troca da fonte fertilizante não resolve o problema. Diagnóstico químico, físico e histórico produtivo precedem a escolha do produto.

A segunda boa prática é comparar a tecnologia com a fonte convencional bem manejada. Ureia com NBPT deve ser comparada com ureia aplicada em condição correta, não com ureia mal aplicada. Fertilizante de liberação controlada deve ser comparado com parcelamento possível. Produto revestido deve ser comparado com aplicação localizada e ajuste de dose. Essa comparação evita atribuir à tecnologia um ganho que poderia vir de manejo básico. (CANTARELLA et al., 2018)

A terceira boa prática é sincronizar liberação e demanda. Fertilizante de liberação controlada aplicado tarde pode liberar nutriente depois do pico de absorção. Produto de liberação lenta em cultura de ciclo curto pode não suprir a fase inicial. Inibidor de nitrificação pode manter N amoniacal quando a cultura demanda mais nitrato. O calendário deve seguir a curva de absorção da cultura (TRENKEL, 2010).

Para Azeem et al. (2014), a quarta boa prática é preservar a integridade do produto. Grânulos revestidos podem perder desempenho se forem quebrados, misturados com produtos incompatíveis ou submetidos a abrasão excessiva. Fertilizantes tratados com inibidores podem perder estabilidade sob armazenamento inadequado, calor, umidade ou tempo prolongado. Produto tecnológico exige logística técnica.

A quinta boa prática é ajustar aplicação ao ambiente. Em superfície seca, ureia pode volatilizar. Em solo encharcado, há risco de desnitrificação. Em solo arenoso, pode ocorrer lixiviação. Em solo ácido com P, pode haver retenção. Em solo salino, doses concentradas agravam estresse. Portanto, fonte e tecnologia devem ser escolhidas com base em risco ambiental real (TIMILSENA et al., 2015)

Para Dimkpa e Bindraban (2018), a sexta boa prática é registrar resultados. Área, cultura, solo, produto, dose, data, chuva, irrigação, aplicação, análise de solo, análise foliar, produtividade e custo devem ser registrados. Fertilizantes modernos só podem ser adotados em escala quando demonstram retorno técnico e econômico no sistema de produção.

Tabela 3. Erros comuns e correções técnicas

Erro	Consequência	Correção
Usar inibidor sem risco de perda	Custo sem ganho agronômico	Diagnosticar mecanismo de perda
Aplicar liberação controlada sem conhecer curva de liberação	Nutriente fora do período de demanda	Conferir duração do produto e ciclo da cultura
Trocar fonte sem corrigir acidez	Baixa raiz e baixa absorção	Corrigir pH, Al^{3+} e saturação por bases
Aplicar dose única alta em solo arenoso	Lixiviação ou salinidade	Parcelar ou ajustar fonte
Misturar produtos sem teste	Precipitação, perda de eficiência ou dano	Fazer teste de compatibilidade
Avaliar só produtividade	Interpretação incompleta	Medir custo, teor foliar, perda e eficiência

Fonte: elaborada a partir de Trenkel (2010), Cantarella et al. (2018), Azeem et al. (2014), Timilsena et al. (2015) e Dimkpa e Bindraban (2018).

Limites e riscos

Fertilizantes modernos não eliminam as leis químicas, físicas e biológicas do solo. Eles apenas modificam velocidade de liberação, transformação ou perda. Se o solo não tem água, a planta não absorve (REETZ, 2017). Se o pH impede raiz, a fonte não resolve. Se a aplicação ocorre fora da fase de demanda, a tecnologia perde sentido.

O custo é limite real. Produtos estabilizados, revestidos ou nanoestruturados podem ter preço maior que fontes convencionais (COELHO, 2025). O retorno depende de produtividade, preço da cultura, risco de perda e economia operacional. Em áreas com baixo risco de perda, a fonte convencional bem manejada pode ter melhor relação benefício-custo. A variabilidade ambiental também limita resposta. Um inibidor pode funcionar em ano seco e não mostrar ganho quando chove após aplicação de ureia. Um fertilizante revestido pode liberar mais rápido sob temperatura elevada ou mais devagar sob baixa temperatura. O desempenho não é propriedade fixa do produto; é interação entre produto e ambiente.

Nanofertilizantes exigem cautela adicional. Dimkpa e Bindraban (2018) discutiram potencial de nanofertilizantes, mas também apontaram necessidade de avaliação sobre comportamento, eficiência e segurança. A recomendação agronômica deve exigir registro, composição, dose, ensaios independentes e avaliação ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fertilizantes modernos ampliam as opções de manejo nutricional, mas não substituem diagnóstico. A tecnologia deve ser escolhida a partir do nutriente limitante, do mecanismo de perda, do solo, da cultura, da água e do momento de demanda.

Fertilizantes estabilizados têm maior sentido quando há risco de transformação rápida e perda. Inibidores de urease reduzem volatilização de NH_3 em condições favoráveis à perda. Inibidores de nitrificação podem reduzir perdas associadas ao nitrato quando o ambiente favorece lixiviação ou desnitrificação.

Fertilizantes de liberação lenta e controlada são úteis quando a curva de liberação coincide com a curva de absorção da cultura. Seu uso exige conhecer duração, temperatura, umidade, integridade do grânulo e demanda nutricional. Sem essa correspondência, a liberação pode ocorrer fora do período de maior necessidade.

Estratégias de aplicação continuam decisivas. Fonte, dose, local e época adequados são a base do manejo. Fertilizantes modernos não corrigem aplicação mal posicionada, dose errada, solo ácido, compactação, salinidade ou falta de água.

O manejo correto exige comparação técnica e econômica com fontes convencionais bem manejadas. A pergunta central não é se o fertilizante é moderno, mas se resolve o problema do sistema. Quando responde a essa pergunta, a tecnologia pode elevar eficiência, reduzir perdas e melhorar sustentabilidade agronômica.

REFERÊNCIAS

AKIYAMA, H.; YAN, X.; YAGI, K. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N_2O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology*, v. 16, p. 1837-1846, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02031.x.

AZEEM, B.; KUSHAARI, K.; MAN, Z. B.; BASIT, A.; THANH, T. H. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, v. 181, p. 11-21, 2014. DOI: 10.1016/j.jconrel.2014.02.020.

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: a review. *Journal of Advanced Research*, v. 13, p. 19-27, 2018. DOI: 10.1016/j.jare.2018.05.008.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 102, p. 267-322, 2009. DOI: 10.1016/S0065-2113(09)01008-6.

COELHO, Fabricio Cardoso. Nanofertilizantes na agricultura: inovações para a nutrição de plantas e a sutentabilidade agrícola. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COSTA, Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade et al. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 33, n. 5, p. 1291-1301, 2009.

DIMKPA, C. O.; BINDRABAN, P. S. Nanofertilizers: new products for the industry? *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 66, n. 26, p. 6462-6473, 2018. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b02150.

FRAZÃO, Joaquim J. et al. Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e ureia na cultura do milho. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 12, p. 1262-1267, 2014.

GUARÇONI M, A. Saturação por bases para o cafeeiro baseada no ph do solo e no suprimento de Ca e Mg. 2017.

GUELFI, Douglas. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. Piracicaba: IPNI, n. 157, 2017.

MENEZES, Guilherme Borba. Estratégias de manejo para minimizar perdas de N por volatilização e aumentar o rendimento de grãos de milho irrigado. 2015.

MORO, Edemar et al. Teor de nitrogênio inorgânico no solo em função de plantas de cobertura, fontes de nitrogênio e inibidor de nitrificação. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, p. 424-435, 2013.

OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. Mercado de fertilizantes: dependência de importações do Brasil. Revista Interface Tecnológica, v. 16, n. 1, p. 489-498, 2019.

PEREIRA, Hamilton Seron. Fósforo e potássio exigem manejos diferenciados. Revista visão agrícola, v. 9, 2009.

REETZ, Harold F. Fertilizantes e seu uso eficiente. São Paulo: ANDA, 2017.

SILVA, Thieres George Freire et al. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. Bragantia, v. 73, n. 2, p. 184-191, 2014.

TIMILSENA, Y. P.; ADHIKARI, R.; CASEY, P.; MUSTER, T.; GILL, H.; ADHIKARI, B. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, 2015. DOI: 10.1002/jsfa.6812.

TRENKEL, M. E. *Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture*. 2. ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010.

CAPÍTULO 8

TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE NUTRIÇÃO FOLIAR NA AGRICULTURA: PRINCÍPIOS, FATORES QUE INFLUENCIAM A EFICIÊNCIA E BOAS PRÁTICAS DE APLICAÇÃO

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Iego Sampaio de Sousa; Maila Pereira de Almeida; João Gustavo Ferreira Casseb; Jéssica Mayla Reis Serra; Natanael Lucena Ferreira; Layse Barreto de Almeida Abreu; Marcos Fernandes dos Santos Farias; Tamiris Alves dos Santos; Pétrik Alves Cavalcante; Igor André da Costa; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: A nutrição foliar consiste na aplicação de soluções fertilizantes sobre folhas, ramos ou órgãos aéreos, com objetivo de corrigir deficiências, complementar a adubação via solo ou suprir nutrientes em fases de alta demanda. Sua eficiência depende da deposição da calda, retenção da gota, molhamento, penetração pela cutícula ou por estruturas epidérmicas, translocação no tecido vegetal e compatibilidade entre nutriente, formulação, ambiente e estádio da cultura. A técnica não substitui a construção da fertilidade do solo, mas pode ter resposta rápida quando a absorção radicular é limitada por seca, frio, encharcamento, pH inadequado, baixa disponibilidade do nutriente ou baixa atividade radicular. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre princípios da nutrição foliar, fatores que influenciam a eficiência e boas práticas de aplicação. A análise mostra que o sucesso da aplicação foliar depende menos da presença do produto no tanque e mais da integração entre diagnóstico, dose, fonte, pH da calda, qualidade da água, horário, umidade relativa, temperatura, tecnologia de gotas, cobertura do alvo e risco de fitotoxicidade.

Palavras-chave: adubação foliar; absorção foliar; tecnologia de aplicação; nutrientes; fitotoxicidade.

INTRODUÇÃO

A nutrição foliar é uma ferramenta de manejo nutricional usada para fornecer nutrientes diretamente aos órgãos aéreos das plantas. A técnica se baseia na capacidade de folhas e outros tecidos superficiais absorverem solutos presentes na calda aplicada. Essa absorção, porém, não é automática. A gota precisa atingir o alvo, permanecer na superfície, manter o nutriente em forma

solúvel, atravessar barreiras epidérmicas e alcançar células metabolicamente ativas (VIANA, 2024)

A adubação foliar não substitui a adubação via solo. O solo continua sendo o principal reservatório de nutrientes para a maior parte das culturas. A aplicação foliar tem função complementar, sobretudo quando há deficiência diagnosticada, exigência temporária da cultura ou limitação da absorção radicular. Fageria et al. (2009) trataram a fertilização foliar como prática capaz de complementar a adubação do solo, desde que usada com diagnóstico e dose adequados.

A eficiência da aplicação depende de fatores físicos, químicos, fisiológicos e ambientais. Entre os fatores físicos estão volume de calda, tamanho de gotas, cobertura, escorrimento e deriva (MOCELLIN, 2004). Entre os químicos estão pH, condutividade elétrica, fonte do nutriente, solubilidade, higroscopicidade, mistura em tanque e uso de adjuvantes. Entre os fisiológicos estão idade da folha, espessura da cutícula, presença de ceras, estômatos, tricomas, estado hídrico e mobilidade do nutriente na planta.

A tecnologia de aplicação é decisiva porque o nutriente só pode ser absorvido se a calda for depositada no alvo (ANTUNIASSI, 2006). Pulverização com gotas muito finas pode aumentar deriva e evaporação. Gotas muito grossas podem escorrer e reduzir cobertura. Folhas cerosas, pilosas, inclinadas ou com baixa molhabilidade exigem ajuste de formulação e aplicação. Assim, a eficiência foliar começa antes da absorção: começa na qualidade da deposição.

Este capítulo discute princípios da nutrição foliar, fatores que influenciam sua eficiência e boas práticas de aplicação. O recorte é agronômico e operacional, com foco em culturas agrícolas. A hipótese interpretativa é que a nutrição foliar eficiente depende da união entre diagnóstico nutricional, tecnologia de pulverização, formulação química e condição ambiental no momento da aplicação.

DESENVOLVIMENTO

Princípios da absorção foliar

A folha é uma superfície biológica protegida por cutícula, ceras, células epidérmicas, estômatos e, em algumas espécies, tricomas. Essas estruturas reduzem perda de água e entrada descontrolada de solutos. Por isso, a absorção foliar

exige que o nutriente supere barreiras físicas e químicas. Fernández e Eichert (2009) revisaram a entrada de solutos hidrofílicos por folhas e discutiram a cutícula, poros aquosos e estruturas superficiais como vias de penetração.

A absorção foliar pode ocorrer por rotas cuticulares e por estruturas epidérmicas. A rota cuticular é influenciada por espessura da cutícula, composição de ceras, hidratação da superfície e propriedades da molécula ou íon aplicado (VIANA, 2024). A presença de umidade prolonga o tempo de dissolução do sal sobre a folha. Quando a gota seca rapidamente, a absorção tende a cair porque o nutriente deixa de estar em solução.

A permanência da gota sobre a folha é etapa crítica. Para haver absorção, a calda precisa molhar a superfície sem escorrer. Superfícies cerosas ou muito hidrofóbicas dificultam espalhamento e retenção (SANTOS 2024). Adjuvantes podem reduzir tensão superficial, melhorar espalhamento ou aumentar adesão, mas o uso sem critério pode causar fitotoxicidade, escorrimento ou incompatibilidade em tanque.

A mobilidade do nutriente dentro da planta também define a resposta. Nutrientes móveis no floema, como nitrogênio e potássio, podem ser redistribuídos com maior facilidade. Nutrientes pouco móveis, como cálcio, tendem a ter efeito mais localizado (FREITA et al., 2007). Por isso, a aplicação foliar de cálcio em frutos deve atingir o órgão-alvo; aplicar apenas nas folhas pode não corrigir distúrbios em frutos com baixa transpiração.

Fatores que influenciam a eficiência

De acordo com Santos (2024), a eficiência da nutrição foliar depende da interação entre planta, produto, calda, ambiente e equipamento. Um produto adequado pode falhar se aplicado em horário quente, com baixa umidade relativa, vento, volume insuficiente, gotas inadequadas ou água incompatível. O erro comum é avaliar apenas a marca do fertilizante e ignorar a tecnologia de aplicação.

A espécie vegetal influencia a resposta. Folhas com cutícula espessa, alta cerosidade ou posição vertical podem reter menos calda (VIANA, 2024). Folhas jovens tendem a absorver mais que folhas velhas em muitos casos, pois apresentam cutícula menos espessa e maior atividade metabólica. Porém, teci-

dos jovens também são mais sensíveis à fitotoxicidade. Assim, dose e estádio fenológico precisam ser ajustados.

A composição da calda interfere na absorção. Fonte do nutriente, solubilidade, pH, salinidade, compatibilidade e concentração definem o risco de precipitação, queima foliar ou baixa penetração. Fageria et al. (2009) apresentaram faixas de concentração para nutrientes usados em pulverização foliar e alertaram que concentrações inadequadas podem reduzir eficiência ou causar injúria. Essas faixas não devem ser copiadas sem ajuste para cultura, produto comercial, clima e estádio da planta.

O ambiente no momento da aplicação é decisivo. Temperatura alta acelera evaporação da gota e reduz tempo de absorção. Umidade relativa baixa também encurta o período em que o nutriente permanece dissolvido. Vento aumenta deriva e irregularidade de deposição. Chuva logo após aplicação pode lavar parte da calda (CHECHETTO, 2013). Portanto, aplicações no início da manhã ou fim da tarde tendem a oferecer melhor condição operacional, desde que não haja molhamento excessivo, orvalho intenso ou previsão de chuva imediata.

Segundo Moreira Junior (2009), a tecnologia de pulverização controla a chegada da calda ao alvo. Tipo de ponta, pressão, velocidade, altura da barra, volume de calda, tamanho de gotas e arquitetura da cultura determinam cobertura e deposição. A nutrição foliar exige cobertura uniforme, mas não encharcamento. Escorrimento representa perda de produto e aumento de risco ambiental.

Tabela 1. Fatores que regulam a eficiência da nutrição foliar

Fator	Efeito sobre a aplicação	Risco técnico	Fonte de apoio
Cutícula e ceras	Controlam molhamento e penetração	Baixa absorção em folhas hidrofóbicas	Fernández e Eichert (2009)
Umidade relativa	Mantém o sal dissolvido por mais tempo	Gota seca antes da absorção	Fernández et al. (2013)
Temperatura	Afeta evaporação e risco de injúria	Fitotoxicidade sob calor	Fageria et al. (2009)
pH e salinidade da calda	Afetam estabilidade e injúria	Precipitação ou queima foliar	Fernández et al. (2013)
Tamanho de gotas	Define cobertura, deriva e escorrimento	Deriva ou baixa cobertura	Fernández; Sotiropoulos; Brown (2013)
Mobilidade do nutriente	Define redistribuição interna	Efeito apenas localizado	Fageria et al. (2009)

Fonte: elaborada a partir de Fernández e Eichert (2009), Fageria et al. (2009), Fernández et al. (2013) e Fernández, Sotiropoulos e Brown (2013).

Tecnologia de aplicação

A tecnologia de aplicação deve transformar uma recomendação nutricional em deposição eficiente no alvo. O primeiro ponto é definir o objetivo: correção de deficiência, prevenção em fase crítica, aplicação em órgão específico ou complemento da adubação via solo. Sem objetivo claro, a pulverização tende a virar aplicação de calendário, com baixa relação entre custo e resposta (MOREIRA JÚNIOR, 2009).

O volume de calda deve ser suficiente para cobrir a superfície-alvo sem escorrer. Em culturas com dossel fechado, folhas sobrepostas ou órgãos internos, volumes muito baixos podem não atingir a área de interesse (CHECHETTO, 2013). Em culturas com folhas expostas e menor massa foliar, volumes muito altos aumentam escorrimento. A regulagem deve ser feita na lavoura, com papel hidrossensível ou outro método de avaliação de cobertura.

O tamanho de gota precisa equilibrar cobertura e segurança operacional. Gotas finas aumentam cobertura, mas elevam risco de deriva e evaporação. Gotas grossas reduzem deriva, mas podem cobrir menos e escorrer em folhas inclinadas ou cerosas. Para nutrição foliar, a escolha da ponta deve buscar cobertura uniforme, deposição no alvo e baixo escorrimento. A qualidade da água precisa ser analisada. pH, dureza, sais dissolvidos, matéria orgânica e turbidez podem alterar estabilidade da calda. Água dura pode reagir com algumas formulações. pH inadequado pode reduzir estabilidade ou aumentar risco de injúria. A correção da água deve ser feita com base em medição, não por hábito (CHECHETTO, 2013).

Para Fernández, Sotiropoulos e Brown (2013), misturas em tanque exigem teste prévio. Fertilizantes foliares podem reagir com defensivos, óleos, adjuvantes ou outros nutrientes. A incompatibilidade pode aparecer como precipitado, separação de fases, aquecimento, formação de grumos ou alteração de pH. Mesmo quando a mistura é fisicamente estável, pode haver fitotoxicidade. O teste de jarra reduz risco, mas não substitui observação em pequena área da cultura.

Esquema 1. Sequência técnica para aplicação foliar

Etapa	Pergunta técnica	Decisão
1	Há diagnóstico de deficiência ou fase crítica?	Aplicar apenas com objetivo definido
2	O nutriente é móvel ou pouco móvel?	Direcionar a calda ao tecido que precisa receber o nutriente
3	A água é compatível?	Medir pH, dureza e condutividade quando possível
4	A mistura é estável?	Fazer teste de jarra e observar precipitação
5	O clima está favorável?	Evitar calor, baixa umidade, vento e chuva próxima
6	A cobertura está adequada?	Conferir deposição com papel hidrossensível

Fonte: elaborado a partir de Fernández, Sotiropoulos e Brown (2013), Fageria et al. (2009) e Fernández et al. (2013).

Boas práticas de aplicação

De com Fageria et al. (2009), a primeira boa prática é aplicar nutrição foliar com diagnóstico. Sintomas visuais ajudam, mas podem confundir deficiência nutricional com seca, fitotoxicidade, doença, compactação, salinidade ou dano por herbicida. Análise foliar, análise de solo, histórico da área e conhecimento do estádio da cultura reduzem erro de decisão. A segunda boa prática é respeitar concentração e dose. A folha não tolera a mesma carga salina que o solo. Doses excessivas podem causar queima, manchas, necrose de bordas, redução de área fotossintética e queda de flores ou frutos. O parcelamento pode ser mais seguro que uma aplicação concentrada, sobretudo para sais com maior risco de injúria.

Para Fernández et al. (2013), a terceira boa prática é ajustar horário e clima. Aplicações devem evitar temperatura alta, vento, baixa umidade relativa e chuva próxima. O início da manhã e o fim da tarde costumam oferecer menor evaporação e melhor permanência da gota. Porém, orvalho intenso pode diluir a calda e aumentar escorrimento. Portanto, o horário deve ser decidido com leitura da condição real da lavoura. A quarta boa prática é calibrar o pulverizador. Ponta desgastada, barra desnivelada, pressão incorreta, velocidade alta e filtros inadequados comprometem deposição. A calibração deve verificar vazão por

ponta, uniformidade, volume aplicado, altura da barra e padrão de cobertura. Sem calibração, a dose planejada não corresponde à dose entregue.

De acordo com Viana (2024), a quinta boa prática é não transformar nutrição foliar em substituta da fertilidade do solo. Nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e fósforo exigidos em alta quantidade não podem ser sustentados apenas por pulverização foliar em lavouras produtivas. A aplicação foliar funciona melhor como ajuste fino, correção rápida ou complemento em fase crítica. A sexta boa prática é registrar cada aplicação. O registro deve conter cultura, estádio, produto, dose, volume de calda, pH da água, adjuvante, horário, temperatura, umidade relativa, vento, chuva após aplicação e observação de fitotoxicidade. Esse histórico permite corrigir falhas e interpretar respostas futuras.

Tabela 2. Boas práticas e erros a evitar

Boa prática	Justificativa técnica	Erro a evitar
Diagnosticar antes da aplicação	Evita tratar problema não nutricional	Aplicação por calendário
Medir pH e qualidade da água	Reduz incompatibilidade e instabilidade	Preparar calda sem análise
Ajustar dose e concentração	Reduz risco de fitotoxicidade	Aumentar dose para “garantir efeito”
Aplicar em clima adequado	Aumenta permanência da gota	Pulverizar sob calor, vento ou baixa umidade
Calibrar equipamento	Garante deposição e dose real	Usar ponta desgastada ou pressão incorreta
Avaliar cobertura	Confirma chegada ao alvo	Supor que a calda atingiu toda a planta
Registrar operação	Permite auditoria técnica	Não anotar clima, dose e resposta

Fonte: elaborada a partir de Fageria et al. (2009), Fernández, Sotiropoulos e Brown (2013) e Fernández et al. (2013).

Limitações da nutrição foliar

A nutrição foliar tem limites. A área foliar disponível, o risco de queima, o volume retido na superfície e a concentração tolerada restringem a quantidade total de nutriente aplicada. Por isso, a técnica é mais adequada para micronutrientes, correções pontuais, fases críticas e situações de absorção radicular temporariamente limitada (FERNANDES et al., 2025).

Para Silva (2018), a resposta também depende da mobilidade do nutriente. Boro e cálcio podem apresentar baixa redistribuição interna em algumas culturas e órgãos. Nesses casos, a aplicação deve atingir diretamente o tecido-alvo. Para frutos, a cobertura do fruto pode ser mais decisiva que a cobertura das folhas. Para folhas jovens, o momento de aplicação precisa coincidir com expansão e demanda.

Outro limite é a fitotoxicidade. Fertilizantes foliares são sais, quelatos, complexos ou formulações orgânicas e minerais. Em concentração inadequada, podem causar injúria. O risco aumenta com alta temperatura, baixa umidade, mistura com óleos, plantas estressadas, folhas jovens e volume com escorrimento (BELO, 2011). A aplicação foliar também pode falhar por lavagem. Chuva logo após pulverização reduz tempo de contato da calda. Irrigação por aspersão após aplicação pode ter efeito semelhante. Quando o nutriente exige tempo maior de permanência na superfície, a previsão do tempo deve orientar a operação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nutrição foliar é tecnologia complementar, não substituta da adubação via solo. Sua eficiência depende da deposição da calda, retenção da gota, solubilidade do nutriente, penetração na folha, mobilidade na planta e condição fisiológica da cultura.

A tecnologia de aplicação define parte expressiva do resultado. Tipo de ponta, pressão, volume de calda, tamanho de gotas, velocidade, altura da barra e cobertura do alvo precisam ser ajustados antes da pulverização. Sem deposição correta, o nutriente não chega ao local de absorção.

Os fatores ambientais controlam o tempo de contato entre calda e folha. Temperatura alta, baixa umidade relativa, vento e chuva próxima reduzem eficiência. O horário de aplicação deve ser escolhido com base em evaporação, risco de deriva, molhamento da superfície e segurança da cultura.

A formulação deve ser compatível com a planta e com a água. Fonte do nutriente, pH, salinidade, adjuvante e mistura em tanque determinam absorção e fitotoxicidade. Teste de jarra, calibração e aplicação em pequena área reduzem risco operacional.

A boa prática é tratar a nutrição foliar como intervenção técnica baseada em diagnóstico. A aplicação deve responder a uma deficiência, fase crítica ou limitação da absorção radicular. Quando usada dessa forma, a nutrição foliar melhora a precisão do manejo nutricional e reduz desperdício.

REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, Ulisses Rocha; BAIO, Fabio HR. Tecnologia de aplicação de defensivos. Revista Plantio Direto, v. 15, n. 4, p. 17-22, 2006.

BELO, Sara Rodrigues Santos. Avaliação de fitotoxicidade através de Lepidium sativum no âmbito de processos de compostagem. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra (Portugal).

CHECHETTO, Rodolfo Glauber et al. Influência de pontas de pulverização e adjuvantes no potencial de redução de deriva em túnel de vento. Semina: Ciências Agrárias, v. 34, n. 1, p. 37-46, 2013.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; MOREIRA, A.; GUIMARÃES, C. M. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 32, n. 6, p. 1044-1064, 2009. DOI: 10.1080/01904160902872826.

FERNANDES, David Braga; CAMPOS, Leonardo Vieira; VENTURA, Matheus Vinicius Abadia. Desempenho da aplicação foliar de nitrogênio na cultura do milho: Eficiência e resposta fisiológica. Research, Society and Development, v. 14, n. 6, p. e7714649069-e7714649069, 2025.

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. H. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrients. *Frontiers in Plant Science*, v. 4, article 289, 2013. DOI: 10.3389/fpls.2013.00289.

FERNÁNDEZ, V.; EICHERT, T. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v. 28, n. 1-2, p. 36-68, 2009. DOI: 10.1080/07352680902743069.

FERNÁNDEZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. H. *Foliar fertilization: scientific principles and field practices*. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2013.

FREITAS, Marta Simone Mendonça et al. Flavonóides e composição mineral de folhas de maracujazeiro amarelo em função da posição da folha no ramo. Ciência Rural, v. 37, n. 6, p. 1634-1639, 2007.

MOCELLIN, Ricardo SP. Princípios da adubação foliar. Canoas: Fertilizantes Omega Ltda, 2004.

MOREIRA JÚNIOR, Orlando. Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas. 2009.

SANTOS, R. M.; SILVA, J. R.; LIMA, C. S.; SOUSA, A. E. C.; SANTOS, M. A. L. Foliar fertilization on the production of grafted dwarf cashew seedlings. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 44, e015819, 2020.

SANTOS, Tarcísio Faria dos. Adjuvantes agrícolas e seus componentes: uma revisão bibliográfica. 2024.

SCHÖNHERR, J. Calcium chloride penetrates pear leaf cuticles via aqueous pores. *Planta*, v. 212, p. 112-118, 2000.

SILVA, Adalberto Alves; SCHLINDWEIN, Jairo André. Limitação nutricional e crescimento de plantas de ipê-roxo em latossolo amarelo distrófico na omissão de nutrientes. South American Journal of Basic Education, Technical and Technological, v. 5, n. 2, 2018.

STEVENS, P. J. G. Formulation of sprays to improve the efficacy of foliar fertilisers. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v. 24, n. 1, p. 27-34, 1994.
VIANA, Rogerio. Nutrição foliar. Editora Dialética, 2024.

CAPÍTULO 9

PANORAMA DOS MACRONUTRIENTES APLICADOS NA AGRICULTURA: FUNÇÕES, DINÂMICA NO SISTEMA SOLO-PLANTA E IMPORTÂNCIA AGRONÔMICA

Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; Francielli Biazi; Jéssica Mayla Reis Serra; Walleska Silva Torsian; Luciano Braga Leopoldino; Layse Barreto de Almeida Abreu; Felipe Gabriel Ferreira; Tamiris Alves dos Santos; Pamela Estefane de Souza Santos; Igor André da Costa; Alasse Oliveira da Silva; Jhonatah Albuquerque Gomes; Dioclea Almeida Seabra Silva

Resumo: Os macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) sustentam processos estruturais, metabólicos e produtivos das plantas. Esses elementos participam da formação de proteínas, ácidos nucleicos, clorofila, membranas, parede celular, enzimas, compostos energéticos, equilíbrio osmótico, abertura estomática, crescimento radicular e enchimento de órgãos dreno. No solo, sua disponibilidade depende de formas químicas, pH, textura, capacidade de troca de cátions, matéria orgânica, umidade, mineralogia, atividade microbiana e histórico de manejo. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre funções, dinâmica solo-planta e importância agronômica dos macronutrientes aplicados na agricultura. A análise mostra que a eficiência da adubação não depende apenas da dose aplicada, mas da sincronia entre disponibilidade no solo, demanda da cultura, crescimento radicular, água, atividade biológica e forma química do nutriente. O manejo agronômico deve integrar análise de solo, análise foliar, correção da acidez, matéria orgânica, fonte, dose, localização, época de aplicação e balanço de exportação pela colheita.

Palavras-chave: fertilidade do solo; nutrição mineral; eficiência nutricional; adubação; sistema solo-planta.

INTRODUÇÃO

A produção agrícola depende da capacidade do sistema solo-planta de fornecer nutrientes em quantidade, forma e momento compatíveis com a demanda da cultura (MENEGALE, 2015). Entre os elementos minerais, N, P, K, Ca, Mg e S são classificados como macronutrientes porque as plantas os exigem em maior quantidade que os micronutrientes. Essa classificação quantitativa não reduz a

complexidade do manejo. Cada macronutriente possui dinâmica própria no solo, via de transporte até a raiz, mobilidade interna na planta e função fisiológica específica.

White e Brown (2010) trataram N, P, K, Ca, Mg e S como macronutrientes minerais obtidos, em geral, a partir do solo. Esses elementos sustentam crescimento, formação de tecidos e metabolismo vegetal. O N integra aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e clorofila. O P participa de ATP, ácidos nucleicos e fosfolipídios. O K regula osmose, estômatos e transporte de solutos. O Ca compõe parede celular, estabiliza membranas e atua como mensageiro celular. O Mg ocupa o centro da clorofila e participa do metabolismo energético. O S integra aminoácidos sulfurados, coenzimas e compostos de defesa.

A disponibilidade desses nutrientes no solo não corresponde ao teor total presente na matriz edáfica. Apenas parte do estoque total está em forma acessível às plantas. Marschner e Rengel (2023) destacaram que a disponibilidade varia conforme nutriente e depende de fatores do solo, da planta e do ambiente, com transporte até a superfície radicular por fluxo de massa e difusão. Essa distinção é central: um solo pode conter estoque total elevado de um nutriente e, ao mesmo tempo, fornecer pouco durante o período crítico da cultura.

De Acordo com Da Silva (2024), a importância agronômica dos macronutrientes resulta da ligação entre nutrição e produtividade. Deficiência de N reduz área foliar e síntese proteica. Baixo suprimento de P limita crescimento inicial e desenvolvimento radicular. Falta de K reduz regulação hídrica, transporte de açúcares e enchimento de órgãos dreno. Carência de Ca compromete raízes, tecidos jovens e frutos. Baixo Mg reduz clorofila, fotossíntese e uso de ATP. Deficiência de S limita síntese de aminoácidos sulfurados e uso eficiente do N.

O manejo moderno dos macronutrientes não pode ser reduzido à aplicação de fertilizante. Fageria, Baligar e Li (2008) discutiram a necessidade de plantas com maior eficiência nutricional para elevar produtividade e reduzir perdas. Essa eficiência depende da interação entre solo, raiz, fonte, ambiente e genética da cultura. Portanto, a recomendação técnica precisa considerar diagnóstico, dinâmica no solo, demanda da cultura, risco de perdas e resposta esperada.

Este capítulo apresenta panorama dos macronutrientes aplicados na agricultura, com foco em funções, dinâmica no sistema solo-planta e importância

agronômica. A hipótese interpretativa é que a eficiência dos macronutrientes depende da coordenação entre fertilidade química, atividade biológica, crescimento radicular, água e momento de aplicação.

DESENVOLVIMENTO

Funções dos macronutrientes nas plantas

O N é um dos macronutriente ligados à formação de biomassa vegetativa. Ele compõe aminoácidos, proteínas, enzimas, clorofila, ácidos nucleicos e compostos associados ao metabolismo (BREDEMEIER, 2000). Sua deficiência reduz crescimento, área foliar, coloração verde, fotossíntese e produção. O excesso pode aumentar crescimento vegetativo, atrasar maturação, elevar suscetibilidade a acamamento e ampliar risco de perdas ambientais.

O P possui função energética, genética e estrutural. Ele integra ATP, ADP, ácidos nucleicos e fosfolipídios. Sua presença é decisiva para crescimento inicial, divisão celular, raiz, florescimento e formação de sementes (RICHARDSON e SIMPSON, 2011). A deficiência tende a reduzir vigor inicial, perfilhamento, expansão radicular e formação de órgãos reprodutivos. Em solos tropicais, o problema não é apenas baixo teor total, mas baixa disponibilidade causada por adsorção e precipitação.

O K atua na forma iônica K^+, sem compor moléculas orgânicas estáveis. Sua função está associada à regulação osmótica, abertura e fechamento estomático, ativação enzimática, transporte de açúcares e equilíbrio elétrico (KANO; CARDOSO; VILLAS BÔAS, 2010). Plantas com deficiência de K podem apresentar menor controle hídrico, menor transporte de fotoassimilados, menor enchimento de grãos ou frutos e maior sensibilidade a estresses.

O Ca possui função estrutural e sinalizadora. Ele participa da lamela média, da parede celular, da estabilidade de membranas e da sinalização por Ca^{2+}. Por ter baixa redistribuição pelo floema, sintomas de deficiência tendem a ocorrer em tecidos jovens, meristemas e frutos com baixa transpiração. No solo, Ca também está associado à correção da acidez por meio da calagem e à redução da atividade de Al^{3+} quando o ambiente químico é corrigido (VITALE, 2022).

O Mg é componente central da clorofila e participa de reações com ATP. Sua deficiência reduz fotossíntese, transporte de carboidratos e crescimento. Como o Mg possui mobilidade interna maior que o Ca, sintomas tendem a aparecer primeiro em folhas mais velhas, com clorose internerval. O manejo do Mg exige atenção à relação com Ca e K, pois desequilíbrios de bases podem reduzir sua absorção (SERRATO e NOERNBERG, 2019).

O S integra aminoácidos sulfurados, como cisteína e metionina, além de coenzimas e compostos relacionados à defesa vegetal. Sua deficiência pode se assemelhar à deficiência de N, mas tende a aparecer em folhas mais jovens por menor mobilidade interna. A disponibilidade de S depende de sulfato na solução, matéria orgânica, mineralização e perdas por lixiviação.

Tabela 2. Funções fisiológicas dos macronutrientes

Nutriente	Forma absorvida predominante	Funções centrais na planta	Sintoma funcional da deficiência	Fontes
N	NO_3^- e NH_4^+	Proteínas, clorofila, ácidos nucleicos e crescimento vegetativo	Baixa área foliar, clorose e menor biomassa	White e Brown (2010); Hawkesford et al. (2012)
P	$H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}	ATP, ácidos nucleicos, fosfolipídios e raiz	Baixo vigor inicial e menor crescimento radicular	Hawkesford et al. (2012); Richardson e Simpson (2011)
K	K^+	Osmose, estômatos, enzimas e transporte de açúcares	Menor controle hídrico e menor enchimento de drenos	Hawkesford et al. (2012); Marschner e Rengel (2023)
Ca	Ca^{2+}	Parede celular, membranas, sinalização e ápices	Morte de tecidos jovens e desordens em frutos	Hawkesford et al. (2012); White e Brown (2010)
Mg	Mg^{2+}	Clorofila, ATP, enzimas e fotossíntese	Clorose internerval em folhas velhas	Hawkesford et al. (2012); White e Brown (2010)
S	SO_4^{2-}	Aminoácidos sulfurados, coenzimas e defesa	Clorose em folhas jovens e menor síntese proteica	Hawkesford et al. (2012); White e Brown (2010)

Fonte: elaborada a partir de White e Brown (2010), Hawkesford et al. (2012), Richardson e Simpson (2011) e Marschner e Rengel (2023).

Dinâmica no sistema solo-planta

A dinâmica dos macronutrientes no solo depende das formas químicas e da interação com a fase sólida, solução do solo, matéria orgânica e microbiota. N e S possuem forte ligação com transformações biológicas. P apresenta baixa mobilidade e alta retenção em minerais. K depende do equilíbrio entre solução, complexo de troca e formas não trocáveis. Ca e Mg são bases trocáveis, sensíveis à acidez, lixiviação e competição com outros cátions (KANO; CARDOSO; VILLAS BÔAS, 2010).

O N é o nutriente com ciclo mais dependente da atividade microbiana e das perdas. Ele entra no sistema por fertilizantes, resíduos, deposição e fixação biológica. No solo, passa por mineralização, imobilização, nitrificação, desnitrificação, volatilização e lixiviação. A forma nitrato possui alta mobilidade e risco de perda por lixiviação. A forma amoniacal pode ser retida no complexo de troca, mas pode sofrer volatilização quando aplicada como ureia em condição favorável à perda.

O P possui dinâmica dominada por adsorção, precipitação e baixa difusão. Após aplicação, parte permanece em solução, parte entra em frações lábeis e parte migra para formas de menor disponibilidade. Microrganismos podem atuar por solubilização e mineralização, mas não eliminam a necessidade de manejo químico. Richardson e Simpson (2011) destacaram que microrganismos mediam a disponibilidade de P por processos ligados a ácidos orgânicos, fosfatases e mobilização de formas pouco disponíveis.

O K chega à raiz por difusão e fluxo de massa. Sua disponibilidade depende de K em solução, K trocável, K não trocável e K estrutural. Solos arenosos e de baixa capacidade de troca de cátions possuem maior risco de lixiviação. Solos com minerais 2:1 podem reter K em intercamadas e liberá-lo em escala mais lenta. Resíduos vegetais podem reciclar K com rapidez porque o nutriente permanece, em grande parte, na forma iônica nos tecidos.

Ca e Mg são cátions trocáveis e fazem parte da saturação por bases. A calagem aumenta Ca e Mg quando o corretivo contém esses nutrientes, eleva pH e reduz Al^{3+} na camada corrigida. O gesso agrícola pode fornecer Ca em

subsuperfície, mas não substitui a neutralização da acidez pelo calcário. A disponibilidade de Mg exige atenção ao equilíbrio com K e Ca, pois competição entre cátions pode afetar absorção (VITALE, 2022).

O S ocorre no solo em formas orgânicas e como sulfato. A forma sulfato é absorvida pelas raízes e pode ser lixiviada em solos com alta percolação. A liberação de S a partir da matéria orgânica depende da mineralização microbiana. Por isso, sistemas com palhada, matéria orgânica e atividade biológica tendem a sustentar melhor o fornecimento gradual de S (SERRATO e NOERNBERG, 2019).

Tabela 3. Dinâmica dos macronutrientes no solo

Nutriente	Forma ou processo dominante no solo	Principal risco de manejo	Implicação agronômica	Fontes
N	Mineralização, nitrificação, imobilização e perdas gasosas	Lixiviação, volatilização e desnitrificação	Sincronizar aplicação com demanda da cultura	White e Brown (2010); Hungria et al. (2010)
P	Adsorção, precipitação e baixa difusão	Baixa disponibilidade após aplicação	Localização, correção do solo e manejo biológico	Richardson e Simpson (2011); Marschner e Rengel (2023)
K	Solução, troca, formas não trocáveis e ciclagem por resíduos	Lixiviação em solo arenoso e depleção por exportação	Avaliar CTC, textura, palhada e balanço de colheita	Marschner e Rengel (2023)
Ca	Base trocável e componente de corretivos	Baixa mobilidade do calcário em superfície	Corrigir acidez e avaliar subsuperfície	Marschner e Rengel (2023)
Mg	Base trocável e componente de corretivos	Antagonismo com K e Ca; lixiviação	Escolher corretivo e manter equilíbrio de bases	Marschner e Rengel (2023)
S	Sulfato e S orgânico	Lixiviação de sulfato e baixa mineralização	Integrar matéria orgânica e fonte sulfatada	White e Brown (2010); Marschner e Rengel (2023)

Fonte: elaborada a partir de White e Brown (2010), Marschner e Rengel (2023), Richardson e Simpson (2011) e Hungria et al. (2010).

Importância agronômica e eficiência de uso

A importância agronômica dos macronutrientes está na ligação direta entre suprimento nutricional, crescimento e produtividade. Maior aplicação, porém, não garante maior resposta. A eficiência depende da capacidade da planta de absorver, transportar, assimilar e converter o nutriente em produção. Fageria, Baligar e Li (2008) discutiram que plantas eficientes no uso de nutrientes podem elevar rendimento e reduzir custo e perdas.

A eficiência de uso de N é crítica porque o nutriente possui alta resposta produtiva e alto risco de perda. O manejo deve considerar fonte, dose, parcelamento, época, umidade, palhada, sistema radicular e potencial produtivo. A fixação biológica em leguminosas e a inoculação com microrganismos promotores de crescimento podem aumentar eficiência, mas não substituem diagnóstico e manejo do solo. Hungria et al. (2010) demonstraram aumento de produtividade de milho e trigo com estirpes selecionadas de *Azospirillum brasilense* e *A. lipoferum* no Brasil.

A eficiência de P depende da redução do contato improdutivo com sítios de adsorção, do crescimento radicular e da exploração da rizosfera. Aplicação localizada, correção da acidez, matéria orgânica, micorrizas e solubilizadores podem melhorar aproveitamento, mas a resposta depende de solo e cultura. A baixa mobilidade do P exige posicionamento técnico do fertilizante (KANO; CARDOSO; VILLAS BÔAS, 2010).

A eficiência de K está ligada à retenção no solo, à água e à demanda de drenos. Culturas com alta exportação exigem balanço cuidadoso. Em solos arenosos, parcelamento pode reduzir perdas. Em sistemas com palhada, a ciclagem pode contribuir para suprimento superficial, mas a absorção depende de umidade na camada onde o K se concentra.

Ca, Mg e S são tratados muitas vezes como nutrientes secundários, mas essa classificação não reduz sua função agronômica. Ca define ambiente radicular e formação de tecidos. Mg sustenta clorofila e metabolismo energético. S participa de proteínas e interage com o metabolismo do N. A falta de qualquer um deles pode limitar produtividade mesmo com NPK em níveis adequados (VITALE, 2022).

Esquema 1. Lógica técnica para manejo dos macronutrientes

Etapa	Pergunta técnica	Decisão agronômica
Diagnóstico	O solo e a folha indicam deficiência ou desequilíbrio?	Integrar análise de solo, análise foliar e histórico da área
Solo	O pH, a CTC, a textura e a matéria orgânica favorecem disponibilidade?	Corrigir acidez, manejar palhada e avaliar risco de perda
Cultura	Qual é o período de maior demanda?	Sincronizar aplicação com crescimento radicular e formação de drenos
Fonte	A forma química é compatível com solo e sistema?	Escolher fonte, solubilidade, dose e localização
Perdas	Há risco de lixiviação, volatilização, adsorção ou antagonismo?	Parcelar, localizar, corrigir solo ou ajustar equilíbrio de bases
Resposta	A produtividade justifica a intervenção?	Avaliar eficiência agronômica e balanço de exportação

Fonte: elaborado a partir de Fageria, Baligar e Li (2008), Marschner e Rengel (2023), White e Brown (2010) e Richardson e Simpson (2011).

Manejo integrado dos macronutrientes

O manejo integrado começa com diagnóstico. A análise de solo orienta correção da acidez, disponibilidade de P, K, Ca, Mg e S, além de indicar limitações químicas. A análise foliar mostra o estado nutricional da planta e ajuda a identificar desequilíbrios que a análise de solo não explica. O histórico da área informa exportação, adubações anteriores, palhada, produtividade, compactação e risco de perdas.

A correção da acidez é base para eficiência dos macronutrientes em solos tropicais. pH muito baixo aumenta Al^{3+}, reduz crescimento radicular e prejudica aproveitamento de N, P, K, Ca, Mg e S. A calagem corrige a camada atingida pelo corretivo e aumenta a saturação por bases. Quando há limitação subsuperficial por baixo Ca ou alto Al, o gesso pode complementar a estratégia, desde que a acidez superficial já tenha sido tratada (KANO; CARDOSO; VILLAS BÔAS, 2010).

A matéria orgânica e a microbiota participam do manejo. Resíduos vegetais fornecem carbono, protegem o solo, reciclam K, N, P e S e estimulam atividade biológica. Microrganismos regulam mineralização, imobilização, fixação biológica de N e disponibilidade de P. Bioinsumos, porém, não substituem fertilidade

química. Eles funcionam melhor em solos corrigidos, com raiz ativa, umidade e substrato (SERRATO e NOERNBERG, 2019).

Para Serrato et al., (2014), a aplicação de fertilizantes deve considerar fonte, dose, local e época. Nutrientes móveis, como N e S na forma de nitrato ou sulfato, exigem atenção ao parcelamento e à chuva. Nutrientes pouco móveis, como P, exigem posicionamento próximo à raiz. K exige cuidado com CTC, textura e exportação. Ca e Mg exigem manejo da acidez e equilíbrio entre bases.

A decisão técnica também deve considerar balanço de nutrientes. Sistemas de alta produtividade exportam quantidades elevadas de macronutrientes. Se a reposição não acompanha a remoção, o solo perde capacidade de suprimento. Se a aplicação excede a demanda e a capacidade de retenção, aumentam perdas, antagonismos e custo. O ponto técnico é manter produtividade com eficiência, não apenas elevar doses.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os macronutrientes aplicados na agricultura sustentam processos fisiológicos e produtivos que não podem ser substituídos por outro elemento. N regula crescimento e síntese proteica. P sustenta energia, raiz e reprodução. K controla osmose, estômatos e transporte de açúcares. Ca estrutura tecidos e melhora ambiente radicular quando ligado à correção da acidez. Mg integra clorofila e metabolismo energético. S participa de aminoácidos, coenzimas e uso eficiente do N.

A dinâmica no sistema solo-planta varia entre nutrientes. N e S dependem fortemente de processos biológicos e perdas por mobilidade. P sofre retenção e baixa difusão. K depende do equilíbrio entre solução, troca e formas não trocáveis. Ca e Mg respondem à acidez, CTC, calagem, lixiviação e competição entre cátions. Essa diferença impede recomendação genérica.

A importância agronômica dos macronutrientes está na relação entre suprimento, momento de demanda e resposta produtiva. A eficiência de uso aumenta quando fertilidade do solo, raiz, água, microbiota e aplicação de fertilizantes são manejadas em conjunto. Doses isoladas, sem diagnóstico, elevam custo e risco de perda.

O manejo adequado exige análise de solo, análise foliar, correção da acidez, escolha de fonte, dose, localização, época, matéria orgânica e balanço de exportação. Em solos tropicais, a integração entre química, física e biologia do solo é condição para resposta consistente.

A recomendação final é tratar macronutrientes como sistema, não como lista de produtos. A planta responde ao conjunto de processos que controlam disponibilidade, absorção, transporte e uso metabólico. O manejo que ignora essa integração pode corrigir um nutriente e criar outro problema nutricional.

REFERÊNCIAS

BREDEMEIER, Christian; MUNDSTOCK, Claudio Mario. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. Ciência Rural, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000.

DA SILVA, Matheus Hashimoto et al. A relação do nitrogênio com o desenvolvimento das plantas e suas formas de disponibilidade. RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218, v. 5, n. 1, p. e514762-e514762, 2024.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; LI, Y. C. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *Journal of Plant Nutrition*, v. 31, n. 6, p. 1121-1157, 2008. DOI: 10.1080/01904160802116068.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MØLLER, I. S.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. London: Academic Press, 2012. p. 135-189. DOI: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*, v. 331, p. 413-425, 2010. DOI: 10.1007/s11104-009-0262-0.

KANO, Cristiaini; CARDOSO, Antonio Ismael Inácio; VILLAS BÔAS, Roberto L. Influência de doses de potássio nos teores de macronutrientes em plantas e sementes de alface. Horticultura Brasileira, v. 28, n. 3, p. 287-291, 2010.

MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. Nutrient availability in soils. In: RENGEL, Z.; CAKMAK, I.; WHITE, P. J. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of plants*. 4. ed. London: Elsevier, 2023. p. 499-522. DOI: 10.1016/B978-0-12-819773-8.00003-4.

MENEGALE, ML de C. et al. Silício: interação com o sistema solo-planta. 2015.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, v. 156, n. 3, p. 989-996, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175448.

SERRANO, João et al. Aplicação de fertilizantes: tecnologia, eficiência energética e ambiente. Revista de Ciências Agrárias, v. 37, n. 3, p. 270-279, 2014.

SERRATO, Gabriel; NOERNBERG, Mauricio. Variabilidade temporal das concentrações de clorofila-A e da temperatura superficial do mar na costa central de Santa Catarina. Metodologias e Aprendizado, v. 2, p. 82-88, 2019.

VITALE, Phelipe Augusto Mariano. Trocadores de Na+/Ca2+: Relação entre estrutura e função. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, v. 105, n. 7, p. 1073-1080, 2010. DOI: 10.1093/aob/mcq085.

CAPÍTULO 10

INTERAÇÃO BIOLÓGICA DO SOLO E DOS MACRONUTRIENTES: MICROBIOTA DO SOLO, CICLAGEM DE NUTRIENTES E BIOINSUMOS

Cydia Larissa Teles de Oliveira; Welica Zaiana Bastos Rocha; Luciano Braga Leopoldino; Layse Barreto de Almeida Abreu; Iego Sampaio de Sousa; Alane Oliveira da Silva; Maila Pereira de Almeida; Francielli Biazi; Jéssica Mayla Reis Serra; Marcos Fernandes dos Santos Farias; Derik Murilo da Silva; Verônica Miriane Ferreira Carrijo; Alasse Oliveira da Silva

Resumo: A microbiota do solo regula processos ligados à fertilidade, como decomposição da matéria orgânica, mineralização, imobilização, fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo, ciclagem de enxofre, formação de agregados e interação raiz-microrganismo. A eficiência dos macronutrientes no sistema solo-planta depende da atividade conjunta de bactérias, fungos, arqueias e outros organismos presentes na rizosfera, na matéria orgânica e nos resíduos culturais. Este capítulo apresenta revisão bibliográfica sistematizada sobre microbiota do solo, ciclagem de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, além do uso de bioinsumos na agricultura. A análise mostra que bioinsumos não substituem correção da acidez, adubação equilibrada e manejo físico do solo. Sua resposta depende de ambiente edáfico favorável, carbono disponível, umidade, compatibilidade com a cultura, estirpe adequada e qualidade do produto. A integração entre manejo biológico, fertilidade química e práticas conservacionistas pode aumentar eficiência nutricional e reduzir perdas de nutrientes.

Palavras-chave: microbioma do solo; rizosfera; fixação biológica de nitrogênio; solubilização de fósforo; biofertilizantes.

INTRODUÇÃO

O solo agrícola abriga microrganismos que transformam resíduos, regulam formas minerais, interagem com raízes e interferem na disponibilidade de macronutrientes. A rizosfera é o ponto de maior contato entre planta e microbiota, pois recebe exsudatos radiculares e concentra microrganismos capazes de alterar pH, liberar enzimas, mobilizar nutrientes e produzir compostos ligados ao crescimento vegetal (SILVA, 2026).

Mendes, Garbeva e Raaijmakers (2013) revisaram o microbioma da rizosfera e mostraram que comunidades microbianas podem conter organismos benéficos, patogênicos e oportunistas, com efeitos sobre crescimento, defesa e funcionamento da planta. Essa leitura é necessária porque a microbiota não deve ser tratada como conjunto homogêneo de "microrganismos bons". O efeito depende da comunidade, do solo, da planta, do manejo e do ambiente.

A ciclagem de macronutrientes depende da atividade microbiana. No caso do nitrogênio (N), microrganismos fixam N_2 atmosférico, mineralizam compostos orgânicos, imobilizam N mineral, oxidam amônio e reduzem nitrato em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio. No caso do fósforo (P), bactérias e fungos podem mineralizar P orgânico, solubilizar compostos de baixa disponibilidade e alterar a rizosfera por ácidos orgânicos e fosfatases. Richardson e Simpson (2011) revisaram a mediação microbiana da disponibilidade de P e destacaram microrganismos como componentes do ciclo do P no solo.

Bioinsumos surgem nesse contexto como ferramentas para explorar processos biológicos já presentes no solo. Inoculantes com rizóbios, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, fungos micorrízicos e outros grupos podem atuar por fixação biológica, promoção de crescimento, solubilização de nutrientes, produção de fitormônios, indução de tolerância a estresses ou competição com patógenos. Glick (2012) revisou mecanismos de bactérias promotoras de crescimento vegetal, como fornecimento de nutrientes, produção de reguladores de crescimento, redução de estresse por ACC desaminase e antagonismo a patógenos.

Para Zimmermann (2025), a adoção de bioinsumos exige cautela técnica. O produto biológico não corrige solo ácido, não elimina compactação, não substitui calagem e não compensa falta severa de nutrientes. Sua eficiência depende da sobrevivência do microrganismo, da colonização da raiz, da competição com a microbiota nativa, da presença de substrato, da umidade, da temperatura, do pH, do manejo de defensivos e da compatibilidade com a cultura. A abordagem correta não é trocar fertilizante por microrganismo, mas integrar fertilidade química, física e biológica.

Este capítulo discute a interação biológica do solo com os macronutrientes, com foco em microbiota, ciclagem de N, P, potássio (K), cálcio (Ca),

magnésio (Mg) e enxofre (S), além do uso de bioinsumos. A hipótese interpretativa é que a eficiência dos macronutrientes depende da integração entre atividade microbiana, raiz ativa, matéria orgânica, água, correção química e manejo agronômico.

DESENVOLVIMENTO

Microbiota do solo e rizosfera

A microbiota do solo é formada por bactérias, fungos, arqueias, protozoários, vírus e outros organismos microscópicos. Esses grupos ocupam poros, agregados, superfícies minerais, resíduos vegetais, raízes e zonas com maior concentração de carbono. A distribuição não é uniforme. A rizosfera possui atividade biológica intensa porque recebe exsudatos radiculares, células descamadas, mucilagem e compostos orgânicos que servem como fonte de energia (SILVA, 2026).

A planta seleciona parte da comunidade microbiana por meio dos compostos liberados pelas raízes. Açúcares, aminoácidos, ácidos orgânicos, fenóis e mucilagens alteram a composição da microbiota próxima à raiz. Pii et al. (2015) revisaram interações microbianas na rizosfera e relacionaram rizobactérias promotoras de crescimento à aquisição de nutrientes pelas plantas.

Para Zimmermann (2025), a microbiota atua como interface entre matéria orgânica e nutrição mineral. Resíduos vegetais contêm nutrientes em formas orgânicas ou retidas em tecidos. Microrganismos degradam esses resíduos, liberam enzimas, imobilizam nutrientes em biomassa e devolvem parte desses nutrientes ao solo por morte celular e lise. Esse ciclo regula a liberação de N, P e S e influencia K, Ca e Mg por efeito sobre agregação, raízes e troca iônica.

Bender, Wagg e Van der Heijden (2016) argumentaram que a biodiversidade do solo sustenta funções ligadas à agricultura, como ciclagem de nutrientes, estrutura do solo, controle biológico e estabilidade do sistema. Essa interpretação desloca o manejo da microbiota de “produto isolado” para “ambiente biológico funcional”.

Tabela 1. Grupos microbianos e funções ligadas à nutrição vegetal

Grupo	Função ligada a macronutrientes	Exemplo de processo	Fontes
Rizóbios	Entrada biológica de N	Fixação de N_2 em leguminosas	Bomfim et al. (2021)
Azospirillum	Promoção de crescimento e uso de N	Estímulo radicular e resposta em gramíneas	Hungria et al. (2010); Santos, Nogueira e Hungria (2021)
Bacillus e *Pseudomonas*	Mobilização de nutrientes e promoção de crescimento	Solubilização de P, fitormônios e antagonismo	Glick (2012); Pii et al. (2015)
Fungos micorrízicos arbusculares	Aquisição de P e água	Exploração do solo por hifas	Pii et al. (2015); Richardson e Simpson (2011)
Comunidades decompositoras	Ciclagem de N, P e S	Decomposição de resíduos e mineralização	Bender, Wagg e Van der Heijden (2016);

Fonte: elaborada a partir das fontes citadas na tabela.

Ciclagem biológica dos macronutrientes

A ciclagem do N depende de transformações microbianas sucessivas. A fixação biológica converte N_2 atmosférico em formas assimiláveis. A mineralização transforma N orgânico em amônio. A nitrificação converte amônio em nitrato. A desnitrificação pode levar à perda de N em formas gasosas (ZIMMERMANN, 2025). Portanto, a eficiência do N no solo depende de equilíbrio entre entrada, transformação, retenção e perda.

A fixação biológica de N é o exemplo mais consolidado de interação entre microbiota e macronutriente. Hungria et al. (2010) avaliaram estirpes de *Azospirillum brasilense* e *A. lipoferum* em milho e trigo no Brasil. No caso da soja, o uso de rizóbios representa tecnologia central da agricultura brasileira, com longa trajetória de pesquisa e adoção, conforme revisão histórica de Bomfim et al. (2021).

O P apresenta baixa mobilidade e forte interação com minerais. A microbiota pode atuar por solubilização de P inorgânico, mineralização de P orgânico e alteração química da rizosfera. Richardson e Simpson (2011) destacaram que microrganismos participam do ciclo do P e podem mediar sua disponibilidade

para plantas por processos como produção de ácidos orgânicos, fosfatases e mobilização de formas pouco disponíveis.

O K não sofre transformação biológica de valência como o N, mas a microbiota interfere em sua ciclagem por decomposição de resíduos, liberação de K da palhada, alteração da estrutura do solo e crescimento radicular (DONEDA, 2012). Como K não integra moléculas orgânicas estruturais, seu retorno a partir de resíduos tende a ser rápido quando há chuva e palhada sobre o solo. A atividade microbiana não "fabrica" K, mas regula o ambiente físico e biológico que afeta absorção e reciclagem.

Ca e Mg são cátions ligados à saturação por bases, estrutura do solo, crescimento radicular e equilíbrio iônico (ABREU, 2001). A microbiota afeta indiretamente esses nutrientes por produção de ácidos orgânicos, formação de agregados, decomposição da matéria orgânica e alteração da rizosfera. Porém, bioinsumos não substituem calagem quando há acidez e alumínio tóxico. O manejo biológico só expressa resposta consistente quando o ambiente químico permite crescimento radicular.

O S tem ciclo microbiano ligado à mineralização de compostos orgânicos, oxidação de formas reduzidas e redução de sulfato em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio (BRITO DE OLIVEIRA, 2012). Em sistemas agrícolas, resíduos vegetais e matéria orgânica funcionam como fontes de S orgânico, cuja liberação depende da atividade microbiana, umidade, temperatura e relação carbono/enxofre.

Tabela 2. Relação entre macronutrientes e processos biológicos do solo

Macronutriente	Processo biológico associado	Efeito agronômico	Fontes
N	Fixação biológica, mineralização, nitrificação e desnitrificação	Entrada, transformação e perda de N	Hungria et al. (2010); Bomfim et al. (2021)
P	Solubilização, fosfatases e micorrizas	Maior acesso a formas pouco disponíveis	Richardson e Simpson (2011); Pii et al. (2015)

K	Decomposição de resíduos e crescimento radicular	Reciclagem e exploração de solo	Bender, Wagg e Van der Heijden (2016); Mendes, Garbeva e Raaijmakers (2013)
Ca	Agregação, rizosfera e crescimento de raízes	Melhor exploração do perfil quando há solo corrigido	Bender, Wagg e Van der Heijden (2016)
Mg	Rizosfera, matéria orgânica e equilíbrio de bases	Suprimento condicionado por solo, raiz e competição iônica	Bender, Wagg e Van der Heijden (2016)
S	Mineralização e oxirredução microbiana	Liberação de sulfato a partir de formas orgânicas	Mendes, Garbeva e Raaijmakers (2013); Bender, Wagg e Van der Heijden (2016)

Fonte: elaborada a partir das fontes citadas na tabela.

Bioinsumos: mecanismos e limites

Bioinsumos agrícolas são produtos baseados em microrganismos, metabólitos ou materiais biológicos usados para favorecer processos de nutrição, crescimento, defesa ou equilíbrio do agroecossistema (DONEDA, 2012). No campo da nutrição vegetal, os grupos mais usados são inoculantes para fixação biológica de N, bactérias promotoras de crescimento, fungos micorrízicos, solubilizadores de P e produtos associados à decomposição de resíduos.

Os mecanismos de ação não são iguais. Rizóbios em leguminosas atuam pela simbiose nodular e fixação de N_2. *Azospirillum* pode favorecer crescimento radicular, absorção de nutrientes e resposta produtiva em gramíneas. *Bacillus* e *Pseudomonas* podem atuar por produção de auxinas, sideróforos, enzimas, solubilização de fosfatos ou competição com patógenos. Glick (2012) revisou mecanismos de bactérias promotoras de crescimento e mostrou que a resposta não depende de um único processo.

A história dos biofertilizantes no Brasil é associada ao avanço de inoculantes com rizóbios, pesquisa em fixação biológica de N e uso de bactérias promotoras de crescimento. Bomfim et al. (2021) revisaram essa trajetória e registraram o desenvolvimento de biofertilizantes no país desde abordagens convencionais até soluções biotecnológicas.

A resposta a bioinsumos depende do ambiente. Solo ácido, compactado, seco, encharcado, salino ou com baixa matéria orgânica reduz a chance de colonização e atividade microbiana. Defensivos, tratamento de sementes, temperatura, qualidade do inoculante, dose, prazo de validade, armazenamento e aplicação também interferem. Por isso, falhas de resposta não devem ser atribuídas apenas ao microrganismo; muitas vezes, o ambiente impede sua expressão (SILVA, 2026).

Santos, Nogueira e Hungria (2021) revisaram o impacto das estirpes *Azospirillum brasilense* Ab-V5 e Ab-V6 na agricultura brasileira e registraram adoção ampla dessas estirpes em cereais, pastagens e coinoculação de leguminosas. O dado reforça que bioinsumos podem ter escala agrícola quando combinam estirpe eficiente, validação agronômica, qualidade industrial e aceitação pelo produtor.

Esquema 1. Decisão técnica para uso de bioinsumos

Diagnóstico	Pergunta técnica	Decisão
Cultura e alvo	A cultura é compatível com o microrganismo?	Escolher produto registrado para a cultura e o objetivo
Solo	pH, alumínio, compactação e umidade permitem raiz ativa?	Corrigir ambiente antes de esperar resposta biológica
Produto	Há estirpe identificada e prazo válido?	Exigir rastreabilidade, armazenamento correto e qualidade
Aplicação	O método preserva viabilidade microbiana?	Evitar calor, mistura incompatível e dessecação
Avaliação	Qual variável comprova resposta?	Medir nodulação, raiz, teor nutricional ou produtividade

Fonte: elaborado a partir de Glick (2012), Hungria et al. (2010), Pii et al. (2015), Bomfim et al. (2021) e Santos, Nogueira e Hungria (2021).

Boas práticas de manejo biológico

A primeira boa prática é construir ambiente edáfico favorável. Bioinsumo não compensa solo com acidez severa, alumínio tóxico, baixa disponibilidade de água ou compactação. A microbiota precisa de poros, carbono, água, raiz e pH compatível. Portanto, calagem, gessagem quando indicada, rotação de culturas,

palhada e redução de revolvimento são práticas que sustentam a resposta biológica (DONEDA, 2012).

A segunda boa prática é tratar bioinsumo como tecnologia viva. Microrganismos podem perder viabilidade por calor, radiação solar, dessecação, armazenamento inadequado e mistura incompatível (ABREU, 2001). Produto fora do prazo, exposto ao sol ou misturado com químico incompatível pode chegar ao solo sem população ativa suficiente. A qualidade do produto deve ser verificada antes da aplicação.

A terceira boa prática é usar inoculante com objetivo agronômico claro. Em leguminosas, o objetivo pode ser nodulação e fixação de N. Em gramíneas, pode ser estímulo radicular e maior eficiência de uso de N(BRITO DE OLIVEIRA, 2012). Em sistemas com P pouco disponível, pode ser mobilização de P e associação com micorrizas. Cada objetivo exige método de avaliação próprio.

A quarta boa prática é não usar bioinsumo como promessa de substituição total de fertilizante. Em muitos casos, o efeito esperado é ganho de eficiência, melhor raiz, maior tolerância a estresse ou menor perda de nutriente. A retirada de fertilizante sem ensaio local pode reduzir produtividade. O ajuste deve ser feito por diagnóstico, histórico da área e teste em faixa (SILVA, 2026).

A quinta boa prática é monitorar resposta. Para rizóbios, avaliar nodulação, cor interna dos nódulos e crescimento. Para *Azospirillum*, avaliar raiz, vigor e produtividade. Para solubilizadores de P, avaliar teor foliar, crescimento e resposta produtiva. Para compostos ligados à decomposição, avaliar palhada, matéria orgânica, atividade biológica e disponibilidade de nutrientes (BRITO DE OLIVEIRA, 2012).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A microbiota do solo participa da disponibilidade de macronutrientes por meio de decomposição, mineralização, imobilização, fixação biológica de N, solubilização de P, ciclagem de S, formação de agregados e estímulo radicular. Esses processos conectam matéria orgânica, raiz e fertilidade química.

A interação entre microbiota e macronutrientes não elimina a necessidade de adubação e correção do solo. Bioinsumos apresentam maior chance de res-

posta quando o ambiente edáfico possui pH adequado, ausência de impedimento físico severo, umidade, matéria orgânica e raiz ativa. Solo quimicamente hostil reduz a eficiência de qualquer inoculante.

N e P são os nutrientes com mecanismos biológicos mais diretos. No N, a fixação biológica representa entrada real de nutriente no sistema. No P, microrganismos podem alterar disponibilidade por solubilização, mineralização e micorrizas. Para K, Ca e Mg, a ação biológica ocorre mais por ciclagem de resíduos, estrutura do solo, rizosfera e crescimento radicular.

Bioinsumos devem ser usados como ferramentas de manejo integrado. A decisão técnica precisa unir cultura, solo, produto, estirpe, aplicação, ambiente e variável de resposta. Sem diagnóstico e sem avaliação, o uso vira aposta comercial, não manejo agronômico.

A estratégia mais consistente combina correção da acidez, equilíbrio de nutrientes, palhada, rotação de culturas, menor degradação física e bioinsumos de qualidade. Esse conjunto cria ambiente para que a microbiota nativa e os microrganismos inoculados expressem função agronômica.

REFERÊNCIAS

ABREU JR, Cassio Hamilton; MURAOKA, Takashi; OLIVEIRA, Fernando Carvalho. Cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação por bases em solos brasileiros adubados com composto de lixo urbano. Scientia Agricola, v. 58, p. 813-824, 2001.

BENDER, S. F.; WAGG, C.; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. An underground revolution: biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 31, n. 6, p. 440-452, 2016. DOI: 10.1016/j.tree.2016.02.016.

BOMFIM, C. A.; COELHO, L. G. F.; DO VALE, H. M. M.; DE CARVALHO MENDES, I.; MEGÍAS, M.; OLLERO, F. J.; DOS REIS JUNIOR, F. B. Brief history of biofertilizers in Brazil: from conventional approaches to new biotechnological solutions. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 52, n. 4, p. 2215-2232, 2021. DOI: 10.1007/s42770-021-00618-9.

BRITO DE OLIVEIRA, Leandra et al. Parâmetros indicadores do potencial de mineralização do nitrogênio de compostos orgânicos. Idesia (Arica), v. 30, n. 1, p. 65-73, 2012.

DA SILVA, Antônio Veimar et al. Importância dos microrganismos do solo para a produtividade agrícola e o equilíbrio ambiental. Revista Tópicos, v. 4, n. 31, p. 1-29, 2026.

DONEDA, Alexandre et al. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

GLICK, B. R. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, v. 2012, article 963401, 2012. DOI: 10.6064/2012/963401.

HUNGRIA, M.; CAMPO, R. J.; SOUZA, E. M.; PEDROSA, F. O. Inoculation with selected strains of *Azospirillum brasilense* and *A. lipoferum* improves yields of maize and wheat in Brazil. *Plant and Soil*, v. 331, p. 413-425, 2010. DOI: 10.1007/s11104-009-0262-0.

MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, v. 37, n. 5, p. 634-663, 2013. DOI: 10.1111/1574-6976.12028.

PII, Y.; MIMMO, T.; TOMASI, N.; TERZANO, R.; CESCO, S.; CRECCHIO, C. Microbial interactions in the rhizosphere: beneficial influences of plant growth-promoting rhizobacteria on nutrient acquisition process. A review. *Biology and Fertility of Soils*, v. 51, n. 4, p. 403-415, 2015. DOI: 10.1007/s00374-015-0996-1.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiology*, v. 156, n. 3, p. 989-996, 2011. DOI: 10.1104/pp.111.175448.

SANTOS, M. S.; NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasilense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 45, e0200128, 2021. DOI: 10.36783/18069657rbcs20200128.

ZIMMERMANN, Maria Luíza dos Santos et al. Análise do potencial de adoção de bioinsumos na produção de grãos em Santa Catarina. 2025.

1° edição

Alasse Oliveira da Silva
Alane Oliveira da Silva
Jhonatah Albuquerque Gomes
Diocléa Almeida Seabra Silva
Natanael Lucena Ferreira

Organizadores

TÓPICOS DE NUTRIÇÃO DE PLANTAS NA AGRICULTURA TROPICAL

TERRIED