

Londrina, PR / Novembro, 2024

Potássio nos sistemas de produção de soja



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura e Pecuária**

e-ISSN 2176-2937

Documentos 465

Novembro, 2024

Potássio nos sistemas de produção de soja

*Fábio Alvares de Oliveira
César de Castro
Ruan Francisco Firmano
Adilson de Oliveira Júnior
Álvaro Vilela de Resende
Dirceu Klepker*

Embrapa Soja
Londrina, PR
2024

Embrapa Soja

Rod. Carlos João Strass, s/n
Acesso Orlando Amaral,
Caixa Postal 4006, CEP 86085981
Distrito da Warta, Londrina, PR
(43) 3371 6000
www.embrapa.br/soja
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Roberta Aparecida Carnevalli*

Secretária-executiva: *Regina Maria Villas Bôas
de Campos Leite*

Membros: *Claudine Dinali Santos Seixas, Clara
Beatriz Hoffmann-Campo, Fernando Augusto
Henning, Ivani de Oliveira Negrão Lopes,
Leandro Eugênio Cardamone Diniz, Maria
Cristina Neves de Oliveira, Mônica Juliani
Zavaglia Pereira e Norman Neumaier*

Publicação digital: PDF digitalizado (2024)

Edição executiva

Vanessa Fuzinatto Dall' Agnol

Revisão de texto

Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite

Normalização

Valéria de Fátima Cardoso (CRB-9/1188)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Vanessa Fuzinatto Dall' Agnol

Foto da capa

Arquivo Embrapa Solos

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Potássio nos sistemas de produção de soja / Fábio Alvares de Oliveira ... [et al.]. – Londrina :
Embrapa Soja, 2024.

155 p. -- (Documentos / Embrapa Soja, e-ISSN 2176-2937 ; n. 465).

1. Potássio. 2. Fertilizante potássico. 3. Sistema de produção. 4. Soja. I. Oliveira, Fábio
Alvares de. II. Castro, César de. III. Firmano, Ruan Francisco. IV. Oliveira Júnior, Adilson de. V.
Resende, Álvaro Vilela de. VI. Klepker, Dirceu. VII. Série.

CDD (21. ed.) 631.85

Autores

Fábio Alvares de Oliveira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

César de Castro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Ruan Francisco Firmano

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, bolsista de desenvolvimento tecnológico e industrial na Embrapa Soja, Londrina, PR.

Adilson de Oliveira Júnior

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR.

Álvaro Vilela de Resende

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Dirceu Klepker

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Cocais, UEP Balsas, Balsas, MA.

Sumário

Introdução	9
Produção nacional, importação e consumo de fontes de potássio	11
Potencial produtivo da soja	15
Dinâmica do potássio no sistema solo-planta	20
Dinâmica do potássio no solo	20
Importância das plantas de cobertura no manejo da fertilidade e na ciclagem de nutrientes no solo	35
Disponibilidade de K na rizosfera e interação com microrganismos	44
Dinâmica do K na planta	46
Importância da análise de solo e de tecido vegetal	51
Análise de solo	52
Análise de tecido	57
Sintomatologia da deficiência de potássio	62
Adubação de sistema	79
Adubação potássica na soja.....	98
Nutrição equilibrada: foco no balanço de nutrientes	108
A importância do potássio nos sistemas de produção ..	115
Potássio e a qualidade da produção	124
Considerações finais	134
Agradecimentos	136
Referências	136

Apresentação

Potássio (K) é um nutriente chave nos programas de adubação e nutrição de plantas e o problema nutricional mais visível nas áreas comerciais de soja do Brasil, decorrente de erros de manejo desse nutriente que é exigido pelas plantas e exportado das lavouras em grandes quantidades, afetando a produtividade e a qualidade dos grãos e sementes.

Esta publicação é fruto de anos de trabalhos de pesquisa de longa duração e de acompanhamento de áreas agrícolas comerciais com a cultura da soja e com as culturas que compõem os sistemas de produção com a soja, com destaque para o milho, e compila um conjunto de contribuições técnicas extraídas dos resultados de pesquisa das Unidades Descentralizadas Embrapa Soja, Embrapa Cocais e Embrapa Milho e Sorgo, além de outros parceiros institucionais presentes nas principais regiões agrícolas do Brasil.

Apesar da nossa geologia não ter sido privilegiada com grandes e distribuídos depósitos de potássio nas terras emersas do Brasil, a tibiez dos governos em atacar este grave problema e dar suporte legal à exploração das reservas do nutriente, faz do agonegocio nacional um grande refém de poucos e organizados mercados internacionais de fertilizantes.

A fragilidade representada pela pequena produção interna de fertilizantes impõe ao Brasil uma forte dependência de poucos países produtores e corporações multinacionais, uma ameaça não só à segurança alimentar, mas também à segurança econômica do País. Hoje, o Brasil importa mais de 95% do potássio consumido na agricultura, sujeito à volatilidade dos preços internacionais dos fertilizantes, a exemplo dos valores elevados praticados

recentemente, em decorrência da crise logística provocada pela pandemia de covid-19, agravada pelo conflito armado na Europa Oriental.

Sem dúvida, o correto manejo da adubação potássica, nosso calcanhar de Aquiles na adubação, é um dos pilares para que, de forma ampla, todas as regiões produtoras possam aumentar a competitividade do País no setor agropecuário.

Alexandre Lima Nepomuceno
Chefe-geral da Embrapa Soja

Introdução

A soja (*Glycine max* L. Merrill) é a cultura que conquistou o Brasil, teve grande impacto na adoção do Sistema Plantio Direto (SPD) e tem sido responsável pela expansão e consolidação de sistemas agrícolas do país. Seu cultivo contribui com o fortalecimento das cadeias do agronegócio e promove avanços no desenvolvimento econômico, social e ambiental de diversas regiões, desde o sul do Rio Grande do Sul, até o extremo norte, nos cerrados de Roraima.

A produção brasileira de soja vem crescendo consecutivamente nas últimas safras, superando 154,6 milhões de toneladas na safra 2022/2023, produzidas em 44,1 milhões de hectares (ha) de terras (Conab, 2024). O sistema produtivo da soja representa o principal mercado de insumos agrícolas no país e, no caso dos fertilizantes, a cultura consumiu 49,9% do total comercializado de adubos no Brasil em 2023 (Anda, 2024). A busca por mais rentabilidade e sustentabilidade econômica desta atividade, bem como, pela redução dos riscos à segurança alimentar, impulsiona o desenvolvimento competitivo de uma ampla cadeia de fornecedores nacionais e multinacionais.

Neste cenário, somente para atender as exigências nutricionais para o manejo da fertilidade do solo e a reposição das exportações de soja (Oliveira Junior et al., 2020), estima-se o consumo equivalente a 18,6 milhões de toneladas de ureia, 9,4 milhões de toneladas de superfosfato simples e 5,6 milhões de toneladas de cloreto de potássio (KCl), considerando 100% de aproveitamento dos fertilizantes.

Nas condições brasileiras, a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) atende integralmente a demanda desse nutriente para a soja, não se observando ganhos de produtividade pela aplicação de fertilizantes nitrogenados (Hungria; Nogueira,

2020). Contudo, os fertilizantes fontes de fósforo (P) e de potássio (K) têm um peso significativo nos custos de produção da soja, com grandes impactos na rentabilidade da cultura. Essa elevada demanda de consumo de P e K pela soja representa um fator de vulnerabilidade do setor agrícola brasileiro, uma vez que as importações representam grande parte do total de fertilizantes necessários para as lavouras brasileiras.

Dentre os macronutrientes com maior impacto para o desenvolvimento da cultura da soja, o manejo do potássio requer a maior atenção, já que é o nutriente proveniente de fontes fertilizantes mais absorvido e exportado pela cultura da soja (Borkert et al., 1994, Oliveira Junior et al., 2020). O manejo adequado do solo para o equilíbrio da nutrição mineral potássica influencia positivamente a nodulação e a disponibilidade de nitrogênio (N) (Abbasi et al., 2012), os componentes de rendimento, como o número de vagens por planta, a porcentagem de vagens com grãos, o tamanho e a massa de grãos, além da qualidade dos grãos, como o teor de óleo, a taxa de enrugamento e grãos chochos e até a sanidade dos grãos (Malavolta, 1980; Munson, 1985).

Além da alta demanda pela soja, a elevada dependência externa de fertilizantes potássicos e o reduzido número de países produtores, ameaça a estabilidade do mercado dessa commodity, que veio a sofrer de forma expressiva com a elevação dos preços dos fertilizantes a partir de 2021, que acumularam maiores altas no ano de 2022, devido, em parte, ao conflito entre Rússia e Ucrânia (Gaiind; Else, 2022; Smith, 2022), mas também pela alta demanda internacional e choques de oferta, promovidos por eventos climáticos, fechamentos de fábricas e mudanças de política por parte dos principais países produtores e exportadores de fertilizantes.

A dinâmica do K no sistema solo-planta envolve potenciais perdas por erosão e lixiviação, além de eventuais desequilíbrios em relação a outros nutrientes como o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg). Por outro lado, a ciclagem do K nos solos agrícolas pode ser potencializada, de forma a aumentar a eficiência de aproveitamento da adubação. Apesar de aparentemente simples, a dinâmica, a compartimentalização e os fluxos desse nutriente nos diferentes ambientes de produção devem ser bem compreendidos, a fim de se identificar as melhores estratégias para o seu manejo.

Nesse contexto, o manejo adequado da fertilidade do solo e o ajuste dos programas nutricionais com K são ferramentas poderosas para o melhor estabelecimento das lavouras, o alcance do potencial produtivo das cultivares modernas e para melhorar a qualidade dos grãos e dos produtos derivados da soja. Portanto, o objetivo da presente publicação foi reunir informações oriundas de estudos desenvolvidos pela Embrapa e parceiros no intuito de promover o melhor entendimento sobre o manejo eficiente do K nos sistemas de produção envolvendo a soja e enfatizar sua relevância como nutriente crucial para a sustentabilidade da agricultura nacional.

Produção nacional, importação e consumo de fontes de potássio

Como as forças geológicas resultaram em uma distribuição desigual dos recursos naturais entre os países, as leis da economia de mercado evoluíram para atender à demanda por nutrientes na agricultura, permitindo que o livre comércio equilibrasse as relações de compra e troca de bens.

A importância do K na agricultura é reconhecida há bastante tempo e os resíduos orgânicos foram as primeiras fontes de nutrientes NPK utilizadas como fertilizantes. No início do século XX e antes de ser uma grande produtora e exportadora de fertilizantes minerais, a Rússia comercializava as cinzas de caules de girassol como fonte de potássio (Putt, 1997).

Além dos aspectos agrônômicos, os fertilizantes são uma questão de segurança alimentar e por que não, de segurança nacional, tendo em vista a alta dependência externa para atender às necessidades agrícolas do Brasil, que alcançaram 97% para o K, 67% para o P e 88% para o N em 2018 (Anda, 2024).

Atualmente, as principais fontes de fertilizantes potássicos utilizadas na agricultura são oriundas de jazidas minerais. No Brasil, a exploração de K em escala comercial se restringe, basicamente, às reservas minerais de silvinita (KCl + NaCl), localizadas nas regiões de Taquari/Vassouras e Santa Rosa de Lima, no estado de Sergipe. Há também potencial para exploração de reservas minerais de carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), localizadas em Rosário do Catete, no referido Estado (Oliveira, 2019; Brasil, 2021).

De acordo com Motta (2020), no entanto, desde as décadas de 1970 e 1980 foram identificadas jazidas de silvinita no estado do Amazonas. A partir de 2010, novos estudos na região de Fazendinha, Arari e Autazes, confirmaram e redimensionaram as reservas localizadas entre 650 e 1.660 m de profundidade. Os empreendimentos para exploração comercial destas jazidas encontram-se em fase de obtenção de licenciamento ambiental e estruturação de operações, já tendo sido autorizada a 1ª licença de instalação para o projeto de exploração de potássio denominado “Projeto Potássio Autazes”.

Outros estudos de prospecção e reinterpretação, realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), indicam a possibilidade

de expansão da ocorrência de sais de potássio para quatro áreas da Bacia do Amazonas, denominadas de Sub-Bacia Evaporítica de Abacaxis (SBEA), Sub-Bacia Evaporítica do Uatumã (SBEU), Sub-Bacia Evaporítica Faro-Juruti (SBEF) e Sub-Bacia Evaporítica Tauari (SBET). De acordo com o levantamento e prospecção, a Bacia do Amazonas tem potencial para produção de 4 milhões de toneladas de KCl ao ano e vida útil de 30 anos, o que poderia reduzir significativamente a dependência de fertilizante potássico importado a médio e longo prazos. De acordo com Oliveira (2019), as reservas de sais de potássio (medidas) no Amazonas são da ordem de 860 Mt.

Segundo o United States Geological Survey (Estados Unidos, 2024), os países com as maiores reservas mundiais de potássio são, em ordem decrescente, Canadá, Belarus, Rússia, Estados Unidos, China, Alemanha e Chile, que representam 88% de toda reserva mundial de K em minas recuperáveis, enquanto o Brasil possui menos de 1%. Este grupo, somado a Israel e Jordânia, também é responsável por mais de 96% da produção anual de fertilizantes potássicos. Neste cenário, a alta dependência brasileira de fertilizantes importados e poucos países produtores/fornecedores resulta em elevados custos de fertilizantes potássicos somados à logística de entrega, fato que constitui forte ameaça à segurança agrícola e tornam a gestão do suprimento deste nutriente relevante e desafiadora no Brasil.

Existem outros minerais fontes de K com potencial para uso em ambientes agrícolas, como as polihalitas ($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$), um fertilizante potássico solúvel importado, que ainda não apresenta um volume de produção e comercialização significativo. O Brasil possui ocorrências significativas de fontes de potássio não tradicionais para a indústria de fertilizantes, como certas rochas silicáticas alcalinas e o verdete (Rajão et al., 2022), que são classificadas na legislação brasileira como remineralizadores

e se caracterizam pela baixa concentração total de potássio e reduzida solubilidade. Assim, sua efetiva exploração pela indústria de fertilizantes carece do desenvolvimento de rotas tecnológicas diferenciadas, que permitam a extração, a concentração e o aumento da solubilidade do K de forma operacionalmente viável e que sejam economicamente competitivas com os processos de produção de fertilizantes a partir dos sais de potássio, silvinita e carnalita no Brasil, além da silvita (KCl) em outros países. Em nível regional, também são utilizadas fontes orgânicas e organominerais contendo baixas concentrações de potássio.

Dada a grande extensão da área cultivada, é majoritária a participação da cultura da soja no consumo brasileiro de K, pois também é elevada a quantidade de potássio removido pela colheita dos grãos, processo denominado agronomicamente de “exportação” do nutriente. A magnitude desses indicadores pode ser mais bem dimensionada com base na produção da safra 2022/2023, de 155,7 milhões de toneladas de grãos (Conab, 2024). Para obter esta produção em 44,1 milhões de hectares cultivados, foram consumidos aproximadamente 6,6 milhões de toneladas de KCl (Anda, 2024). Considerando a exportação média pela colheita das lavouras de soja equivalente a 22 kg de K_2O por tonelada de grãos, contabilizam-se 3,4 milhões de toneladas de K_2O , correspondendo a aproximadamente 5,7 milhões de toneladas de KCl requeridas somente para garantir as quantidades de K contidas nos grãos e exportadas das lavouras. Este número representa 87% da quantidade aplicada nas áreas produtoras de soja.

Considerando as exportações brasileiras de soja em 2023, de 101,9 milhões de toneladas de grãos, principalmente para a China, além de 22,5 milhões de toneladas na forma de farelo (Comexstat, 2024), foram removidas para fora do território nacional, aproximadamente, 2,8 Mt de K_2O a partir das lavouras

de soja. Portanto, uma quantidade equivalente a 4,6 Mt de KCl, que é aproximadamente 10 vezes superior ao total produzido no país, limitado a 430,5 mil t de KCl em 2020, na mina de Taquari-Vassouras, em Sergipe (Anda, 2024). Por outro lado, representa 42% da quantidade total de KCl importada pelo Brasil naquele ano (Anda, 2024).

Diante do exposto, percebe-se a fragilidade da agricultura brasileira em relação ao fertilizante potássico, já que a produção nacional tem atendido menos de 5% do consumo interno deste fertilizante, que, por sua vez, equivale a 17% da produção mundial de fontes de potássio (Estados Unidos, 2024), evidenciando uma dependência crítica de importação de K, num cenário de expansão da produção de soja e de outras culturas no País.

Potencial produtivo da soja

Nosso alimento vem dos grãos que semeamos em nosso solo e dos frutos que nossas árvores produzem, e estes crescem graças ao nosso clima e a água que chega do Tigre e do Eufrates.

The last pagans of Iraq: Ibn Wahshiyya and his Nabatean Agriculture (~ início século X).

Hämeen-Anttila (2006)

É lícito aos agricultores o desejo de obterem altas produtividades. Contudo, muitas vezes, o planejamento da atividade agrícola é restrito, principalmente, à escolha da cultivar/híbrido e dos pacotes de produtos fitossanitários, resultando em programas de adubação padronizados. No entanto, observa-se na Figura 1, uma representação esquemática dos principais fatores que reduzem o potencial genético máximo das

culturas. Entre eles, alguns são praticamente impossíveis de interferir, como aqueles relacionados ao clima, enquanto outros, devem ser enfrentados com práticas culturais e de manejo sustentáveis.

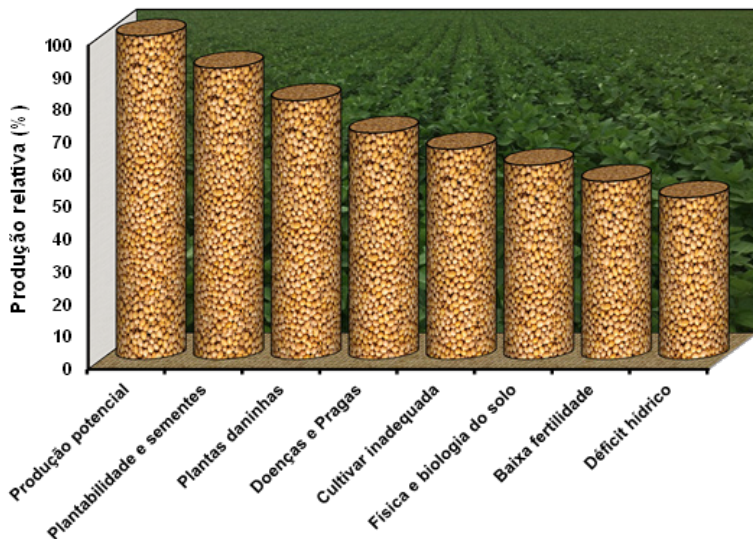


Figura 1. Representação esquemática dos principais fatores que reduzem o potencial genético máximo das cultivares.

Fonte: adaptado de Havlin et al. (2017).

Um dos primeiros problemas na implantação da cultura é a uniformidade e a qualidade da população de plantas, resultante da operação de semeadura (plantabilidade) e da qualidade de sementes. Plantabilidade se traduz, principalmente, pela qualidade da distribuição espacial das sementes e estabelecimento do estande adequado de plantas, para uma cultivar, em determinada região. Apesar da evolução tecnológica das semeadoras modernas, muitas vezes as condições de semeadura não são ideais ou ocorrem falhas na operação, ocasionadas pela

busca de maior rendimento operacional. A outra questão é a qualidade de sementes, caracterizada pelo poder germinativo e o vigor, atributos essenciais para se alcançar o estande de plantas planejado e o desenvolvimento vegetativo inicial mais vigoroso (Figura 2).

Foto: César de Castro



Figura 2. Desenvolvimento inicial de plântulas de sementes com vigor decrescente (esquerda para a direita).

Plântulas oriundas de sementes com baixo vigor, em geral, indicam que a lavoura deverá apresentar problemas no estabelecimento, pela desuniformidade da germinação e do desenvolvimento inicial, acarretando maiores dificuldades para

o manejo fitossanitário e redução da produtividade. Nesta situação, pouco adiantará a adoção do melhor manejo da fertilidade do solo para obtenção de elevadas produtividades, pois as falhas de estande impactarão negativamente o incremento potencial dado pela adição de nutrientes via adubação.

Outro problema que afeta o potencial de produção é o controle inadequado de plantas daninhas, principalmente nas primeiras etapas do ciclo da cultura, pela competição por água, luz e nutrientes, dificultando os tratos culturais e até a colheita. A evolução e a dinâmica das pragas e doenças, são outro grande problema que tem elevado os custos de produção e reduzido o potencial produtivo das lavouras, além do uso incorreto de defensivos representar riscos para a saúde humana e o ambiente.

Com a expansão da soja para diferentes regiões, a escolha da cultivar com adaptação edafoclimática é fundamental. No entanto, além da recomendação oficial do obtentor, o posicionamento pode ser mais bem qualificado com a realização de testes pelos produtores em microrregiões específicas, considerando a avaliação de épocas de semeadura e do ajuste de população, mas também o sistema de produção e a condição de fertilidade do solo.

Fundamentos da Adubação

- Potencial extração da cultura.
- Fertilidade atual do solo.
- Máxima eficiência econômica.

Ainda assim, mesmo com a escolha das melhores cultivares, deve-se planejar e executar corretamente o manejo do ambiente de produção, com objetivo de promover a melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Esta etapa é fundamental, pois qualquer limitação ao desenvolvimento das

raízes, reduzirá a absorção de água e nutrientes pelas plantas, com impactos negativos sobre a produtividade. Por essa razão, a falta de adequado controle da acidez do solo e/ou de disponibilidade de nutrientes em níveis suficientes às demandas nutricionais das plantas constituem o segundo fator mais limitante à produtividade, atrás apenas do déficit hídrico (Figura 1). Nos solos tropicais, de modo geral, somente com as práticas de correção da acidez e de adubação para elevar a disponibilidade de nutrientes, as quantidades absorvidas atenderão às exigências da cultura, diminuindo a limitação da produtividade pelo fator fertilidade do solo.

Finalmente, dentre todos os fatores que podem interferir na produtividade, o suprimento inadequado de água, principalmente nos estádios críticos de maior demanda hídrica, é aquele que afeta mais drasticamente o desenvolvimento das plantas, sendo um dos principais critérios para o zoneamento de risco climático das culturas.

Quando estes e outros fatores são minimizados, as culturas podem alcançar produtividades próximas ao valor teórico potencial. Assim, é preponderante manejar a lavoura de forma a evitar ou minimizar os principais fatores limitantes, não confiando que somente a genética das plantas seja determinante da produtividade.

Para o produtor obter sucesso, portanto, é fundamental conhecer o solo, o histórico da área, as características e demandas agronômicas do material genético, e realizar as operações agrícolas sob condições adequadas, como a semeadura na época e população recomendadas, adubação com nutrientes baseada na fertilidade do solo e demanda da cultura, bem como adotar práticas, tecnologias ou estratégias para mitigar os estresses de origem biótica (e.g., insetos-pragas, plantas daninhas e doenças) e abiótica (e.g., déficit hídrico, fertilidade, elevada acidez com alumínio tóxico e compactação, entre outros).

Dinâmica do potássio no sistema solo-planta

As leis da Natureza nada mais são que pensamentos matemáticos de Deus.

Platão (348/347 a.C)¹

The Bizarre (1888)

Dinâmica do potássio no solo

Em condições de pressão, temperatura, volume, umidade e outras variáveis rigorosamente controladas, o organismo funciona como bem entender.

Lei de Murphy (1991)

Corolário:

1. Nem sempre a natureza segue o que acreditamos estar definido, e previsível;
2. Em outras palavras, temos ainda muito o que aprender.

O K é relativamente abundante na natureza, compondo cerca de 2,5% da crosta terrestre (Epstein; Bloom, 2006) e 0,83% da constituição dos solos (Lindsay, 1979), em termos de massa. Os principais minerais primários e secundários fontes de K para os solos são os silicatos potássicos, pertencentes ao grupo das micas (filossilicatos), nas quais o nutriente localiza-se em diversas posições entre as lâminas de tetraedros de silício e octaedros de alumínio (cavidades ditrigonais), e ao grupo dos feldspatos (tectossilicatos), ligado covalentemente

¹ Citados também como sendo de Euclides de Alexandria (~300 a.C) e Johannes Kepler (1571-1630).

aos interstícios da rede cristalina em ortoclásios, sanidinas e microclínios (Prasad; Power, 1997).

O Brasil possui uma grande área com solos tropicais muito intemperizados, representados por Latossolos e Argissolos (Santos et al., 2018) de mineralogia composta predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita) e de alumínio (gibbsita) e argilas do tipo 1:1 (caulinita), que conferem baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e que apresentam pouca reserva natural de K em suas frações minerais, quando comparados com solos menos intemperizados, ricos em minerais silicatados do tipo 2:1, como vermiculitas e esmectitas.

Devido aos resíduos oclusos de minerais primários fontes de K interestratificados com caulinita (Melo et al., 2003), a participação de formas de K não-trocáveis na nutrição das plantas pode ser representativa em alguns solos tropicais (Martins et al., 2004), sendo este fenômeno mais expressivo em áreas que não recebem adubação potássica nas quantidades necessárias ou que são manejadas em sistemas intensivos, com espécies que tenham requerimento elevado do nutriente.

O K pode ser encontrado em formas ou frações distintas no solo (Figura 3), cujas são classificadas de acordo com o grau de associação com a fase sólida: solúvel (0,1 a 0,2%), trocável (1 a 2%), não-trocável (1 a 10%) e estrutural (90 a 98%) (Barber, 1984; Havlin et al., 2017; Bell et al., 2021). Embora elas mantenham-se em equilíbrio, sua separação é arbitrária. O K em solução (K^+) expressa todo potássio livre na forma iônica. O K-trocável representa a porção do nutriente adsorvida às cargas elétricas negativas de coloides minerais e orgânicos, sendo extraído e quantificado por soluções ácidas ou salinas, por exemplo, com a solução Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025 M + HCl 0,05 M). O K não-trocável corresponde à fração retida entre as

camadas de minerais secundários 2:1, em posições não prontamente trocáveis, de alta densidade de carga negativa (Barber, 1984). E por fim, o K estrutural é a porção do elemento oclusa na estrutura cristalina de minerais primários.

A depender do material de origem dos solos, o K estrutural está presente em minerais primários silicatados, predominantemente na forma de K eletroquimicamente ligado às superfícies entre camadas dos filossilicatos (micas) ou constituinte do arranjo estrutural tridimensional dos tectossilicatos (feldspatos), formas estas que apresentam potencial de solubilização distintos (Bell et al., 2021).

Elaboração: Ruan Francisco Firmano.

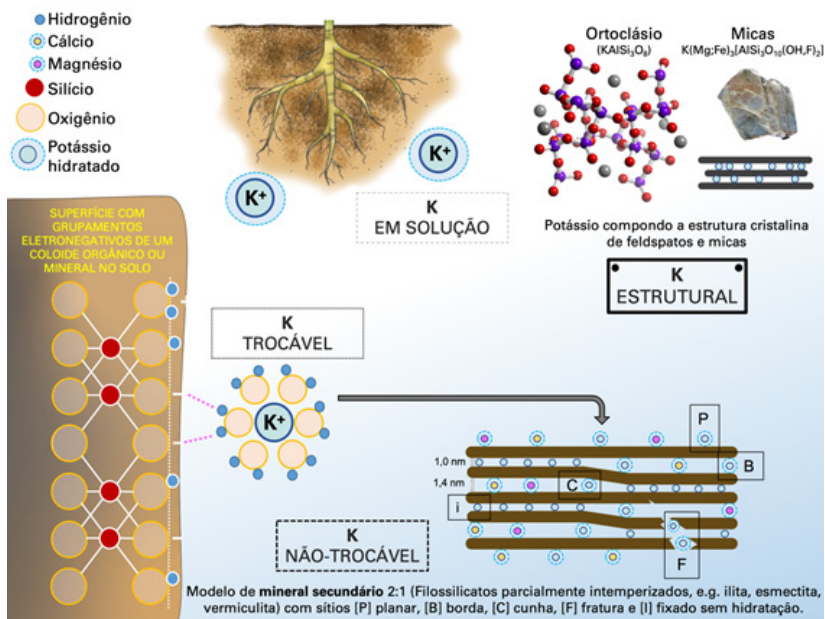


Figura 3. Representação esquemática das formas de K nos solos, as quais implicam diferenças de biodisponibilidade.

Nos solos tropicais, a CTC varia em função do tipo e quantidade de argila, do teor de matéria orgânica e do pH do solo. As cargas variáveis do solo, dependentes de pH, são o

principal atributo que determina a relação entre o K trocável e o K solúvel, exercendo efeito direto na biodisponibilidade e na movimentação de K no perfil dos solos. Mesmo sendo um bom indicador da capacidade de suprimento de K às plantas em solos de regiões tropicais úmidas, a fração do K trocável (determinada em análises de rotina de fertilidade do solo) não é a única responsável pela nutrição e manutenção das produtividades das culturas em médio e longo prazos (Kaminski et al., 2010; Moterle et al., 2019). Na Figura 4, as formas de K de baixa disponibilidade no solo estão representadas de modo simplificado e ilustrativo, com ênfase nas diferentes posições que o nutriente ocupa em minerais.

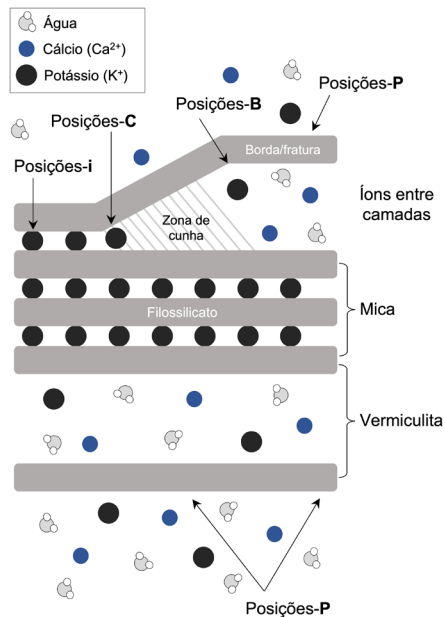


Figura 4. Representação das posições de adsorção de K em regiões planas e fraturadas de micas, e camadas externas de vermiculita oriunda do intemperismo de micas. Superfície plana (Posições-P), entre camadas (Posições-i), borda (Posições-B) e cunha (Posições-C).

Fonte: Adaptado de Mengel (1985), Mei et al. (2015), Rich (1968), Bell et al. (2021).

Ao se realizar a adubação potássica, eleva-se prontamente o teor de K em solução, e isso altera o equilíbrio do nutriente entre as fases sólida e líquida, favorecendo a absorção pelas plantas e, também, a ocupação dos sítios de troca catiônica através de mecanismos de adsorção e/ou dessorção no solo. Esta movimentação e equilíbrio do K nas frações da fase sólida é proporcional à CTC do solo, a qual é responsável pela prevenção das perdas do nutriente por lixiviação.

Por outro lado, a remoção de K da solução do solo origina um gradiente de concentração deste nutriente entre as frações ligadas à fase sólida (mineral ou orgânica) e a solúvel. Para restabelecer o equilíbrio entre as fases, ocorre a liberação lenta de K das frações trocável e posteriormente não-trocável, possivelmente por difusão. Essa capacidade de liberação representa o poder tampão do solo em relação ao suprimento de K (Havlin et al., 2017). Assim, o poder tampão de potássio (PTK) é o resultado da relação entre as concentrações do nutriente adsorvido nas fases sólidas (ΔQ) e disponível na solução do solo (ΔI). O PTK é dependente da CTC, da matéria orgânica e dos argilominerais constituintes do solo, que determinam a capacidade de retenção de K das frações sólidas, não-trocável e trocável. Os solos, em maior ou menor grau, apresentam formas de K que não são acessadas por extratores convencionais (K não-trocável), mas que atuam na dinâmica do nutriente no solo (Figura 5) e na nutrição de plantas.

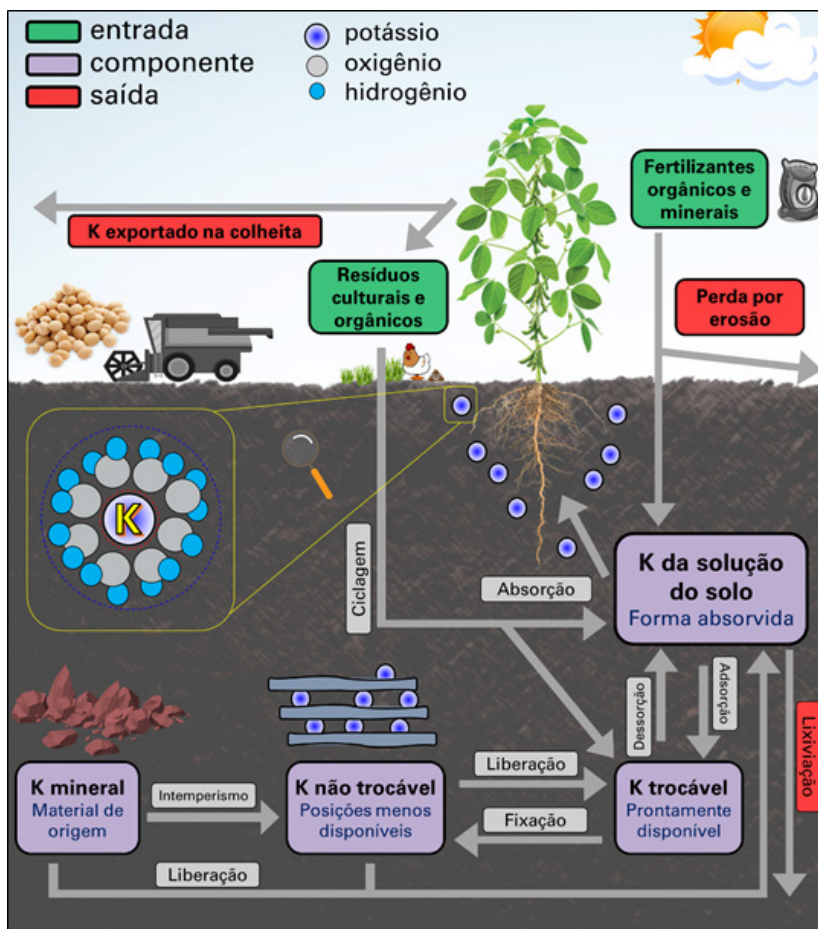


Figura 5. Representação da dinâmica do potássio nos solos agrícolas.

Fonte: Adaptado de Mikkelsen e Roberts (2021).

A presença de cátions na fase trocável do solo é determinada pelo manejo da adubação e por propriedades físico-químicas dos íons em solução, em especial sua carga e raio iônico hidratado (Mengel; Kirkby, 1987; White; Greenwood, 2013). De modo geral, quanto maior a carga e menor o raio iônico

hidratado, maior será a força de atração entre o cátion e a superfície eletronegativa dos coloides do solo. A sequência preferencial de adsorção de cátions, conforme a força decrescente de atração aos coloides, é denominada série liotrópica ou série de Hofmeister (Hofmeister, 1888). O íon K^+ possui apenas uma carga positiva, já os íons Ca^{2+} e o Mg^{2+} , apresentam duas cargas em suas formas livres. Entretanto, o raio iônico hidratado do K^+ mede aproximadamente 0,53 nm, quase a metade dos raios do Ca^{2+} (~0,96 nm) e do Mg^{2+} (~1,08 nm) (Evangelou; Phillips, 2005). Essa última propriedade confere ao K relativa força de adsorção ao solo, limitando a lixiviação deste nutriente em grau expressivamente maior quando comparado com o Ca ou o Mg.

Além dos fatores carga elétrica e raio iônico hidratado, a concentração absoluta de Ca, Mg e K solúveis também influencia na competição pelos sítios de troca e na capacidade de adsorção de K. Assim, em solos de acidez corrigida e elevada disponibilidade de Ca e Mg, a aplicação de doses excessivas de fertilizante potássico solúvel poderá promover a movimentação mais intensa deste nutriente no perfil do solo, para camadas abaixo de 20 cm. Contudo, na maioria das áreas de produção de soja que não recebem fertilizações tão elevadas, mesmo em solos muito intemperizados e que apresentam teores naturalmente baixos de K, as perdas por lixiviação não são significativas.

A lixiviação ou a indisponibilidade do íon K^+ no perfil dos solos de textura média a arenosa, ou com menor CTC, é um motivo de preocupação quando são aplicadas grandes quantidades de corretivos de acidez e, ou, condicionadores de solo. Isso se deve a possíveis desequilíbrios com Ca e Mg, que são constituintes dos corretivos. Ou mesmo ao carreamento de K pela associação com sulfato e formação do par iônico K_2SO_4 . Assim, com o objetivo de avaliar a dinâmica do K aplicado via adubação no solo, e gerar informações alinhadas com as

preocupações do produtor, a Embrapa realizou diversos estudos para a avaliação e dimensionamento das possíveis perdas de K em função da textura dos solos e sob diversas condições de manejo deste nutriente.

No trabalho de Borkert et al. (2005), foram organizados os resultados de uma série histórica, iniciada na safra 1984/1985, sobre os efeitos da aplicação anual de doses até 200 kg/ha de K_2O em um Latossolo originário de basalto, com teor de argila muito alto (~700 g/kg), CTC de 11-12 $cmol_c/dm^3$ e V de 60%, em Londrina, PR. Após 17 ciclos de cultivos anuais, ao final da safra 2000/2001, o K trocável avaliado até a profundidade de 80-100 cm apresentou acúmulo crescente com a dose aplicada, contudo, houve variação significativa apenas na camada de 0-20 cm, e somente em doses superiores às quantidades anuais exportadas pelas culturas (120 até 200 kg/ha de K_2O). O maior acúmulo foi verificado na camada de 0-20 cm, com teores variando de 0,05 $cmol_c/dm^3$ até 0,53 $cmol_c/dm^3$, confirmando a capacidade elevada de retenção de K trocável em determinados solos argilosos tropicais (Figura 6A). Também houve movimentação e acúmulo de K trocável na camada de 20-40 cm, em valores superiores em relação à testemunha. Contudo, nas camadas de 40-100 cm os teores de K trocável mantiveram-se inferiores a 0,10 $cmol_c/dm^3$ em todos os tratamentos, caracterizando uma movimentação não significativa do íon K^+ em profundidade.

De acordo com Rosolem e Steiner (2017), solos tropicais de textura média e argilosa cultivados em sistema plantio direto somente apresentam perdas de K por lixiviação quando as doses aplicadas superam a demanda das culturas. Daí a importância de se dimensionar as adubações potássicas de forma equilibrada com a demanda do sistema de produção, buscando um balanço sem déficits ou excedentes significativos (Kaminski et al., 2010).

Nos estudos realizados em dois ambientes do Cerrado de Mato Grosso, o primeiro em Neossolo Quartzarênico de textura arenosa (140 g/kg de argila), CTC de 5-6 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e V de 50-60% e o segundo em Latossolo Vermelho distrófico de textura média (190 g/kg de argila), CTC de 4-5 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e V de 40-50%, com teores iniciais de K muito baixos, a capacidade de retenção de K observada na camada superficial foi muito menor do que nos solos argilosos, com o gradiente variando de 0,05 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ a 0,2 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Figuras 6B e 6C). Nestes solos, o movimento do íon K^+ no perfil foi maior, principalmente, quando foram aplicadas doses superiores a 80 kg/ha de K_2O , com acúmulo de K principalmente na camada de 0 até 40 cm. Abaixo de 40 cm, no entanto, a movimentação de K ocorreu em menor escala e foi dependente das doses aplicadas e proporcional ao número de cultivos sucessivos (Oliveira et al., 2004; Castro; Oliveira, 2005). Estes resultados indicam que, mesmo em solos de textura leve, bem manejados e com boa distribuição de raízes no perfil, principalmente em sistemas de rotação de culturas e com plantas de cobertura, o K trocável permanece acessível (Castro; Oliveira, 2005) e incorporado ao ciclo de nutrientes do sistema solo-planta.

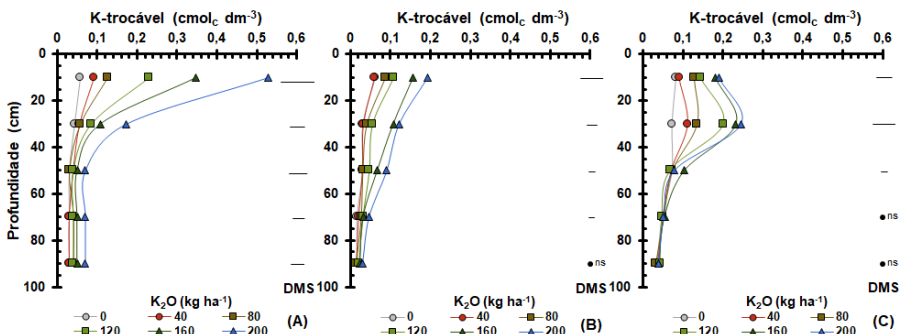


Figura 6. Teor de potássio trocável no perfil do solo em função das doses anuais aplicadas; (A) após de 7 safras (1994/1995 a 2000/2001), em Londrina-PR (Borkert et al., 2005); (B) após 4 safras (1997/1998 a 2000/2001), em Guiratinga-MT (modificado de Oliveira et al., 2004); (C) após 2 safras (2001/2002 a 2002/2003, em Pedra Preta-MT (modificado de Castro e Oliveira, 2005).

A capacidade de retenção e acúmulo de K nas camadas superficiais dos solos tropicais é devida basicamente à CTC, que é dependente da quantidade de argila e sua composição mineralógica, mas, principalmente, do teor de matéria orgânica (Ferreira et al., 2022). Enquanto nos solos argilosos em estudo do Paraná, os valores de CTC variaram de 11 a 12 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, nos dois solos de textura média-arenosa, com predominância de óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), a CTC variou de 4 a 6 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$. Não obstante as diferenças de manejo, regime de chuvas e época de coleta das amostras, esta é a razão do comportamento distinto em termos de movimentação e estocagem do K no perfil do solo e, conseqüentemente, da necessidade de adoção de estratégias de manejo adequadas para cada ambiente.

A movimentação do K^+ solúvel no perfil do solo é dependente da textura, da estrutura e da mineralogia do solo, e do volume de água infiltrada, podendo ser influenciada também pelo equilíbrio de bases trocáveis (Ca, Mg e K), determinada pelas quantidades, tipo e forma de aplicação de calcário e de gesso no solo. Visando melhor entendimento do efeito desses corretivos na dinâmica de K, estudos de longa duração foram conduzidos em solo de textura muito argilosa (~700 g/kg de argila), sob rotação de culturas de grãos verão/outono-inverno em Londrina-PR, desde 2010 até os dias atuais. Constatou-se que a dinâmica de movimentação de K no perfil solo até 60 cm não foi alterada pelo manejo da acidez superficial e subsuperficial combinado com aplicações equilibradas de K_2O (Figura 7). Ainda que a elevação dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} tenha promovido maior competição pelos sítios de troca catiônica, compreende-se que há um efeito de compensação pela liberação de cargas dependentes de pH, anteriormente ocupadas por H^+ e Al^{3+} .

Os menores teores de K^+ são resultado, em parte, da maior exportação do nutriente decorrente do aumento de produção de grãos pela redução da limitação por acidez do solo. Também, deve-se considerar a movimentação de K entre as frações trocável e não-trocável em direção ao equilíbrio final das espécies químicas predominantes no solo.

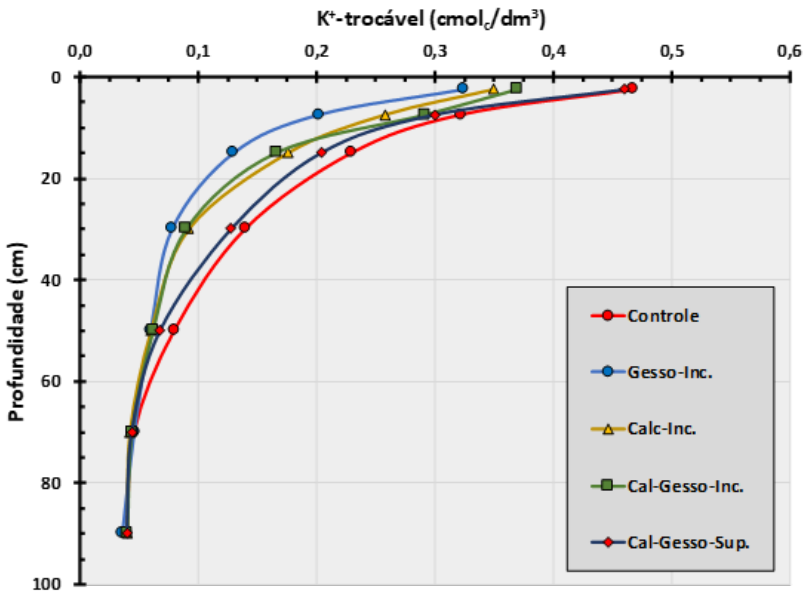


Figura 7. Efeito da aplicação de calcário dolomítico e de gesso nos teores de K trocável em diferentes profundidades camadas de solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), safra 2015/2016, Londrina-PR. Trat. 1: Controle; Trat. 2: Gesso incorporado; Trat. 3: Calcário incorporado; Trat. 4: Calcário e gesso incorporados; Trat. 5: Calcário e gesso superficiais.

Na Figura 8, no mesmo experimento da Figura 7, observa-se o aumento dos teores de Ca , Mg e da saturação por base ($V\%$) dos tratamentos calcário incorporado, calcário e gesso incorporado e calcário e gesso superficial, até os 50 cm

de profundidade. No entanto, no tratamento com gesso incorporado, os teores de Ca e de Mg na profundidade de 0 a 5 cm, são menores e, conseqüentemente, menor o valor de V% na mesma profundidade. Nas demais profundidades, o comportamento do tratamento é semelhante aos demais. Para o S, somente o tratamento calcário e gesso superficial teve menor teor do nutriente nos primeiros 5 cm do solo. A partir de 5 cm a 10 cm de profundidade, todos os tratamentos tiveram o mesmo comportamento, com maior acúmulo de S na profundidade de 60 cm a 80 cm e ligeira redução até os 100 cm.

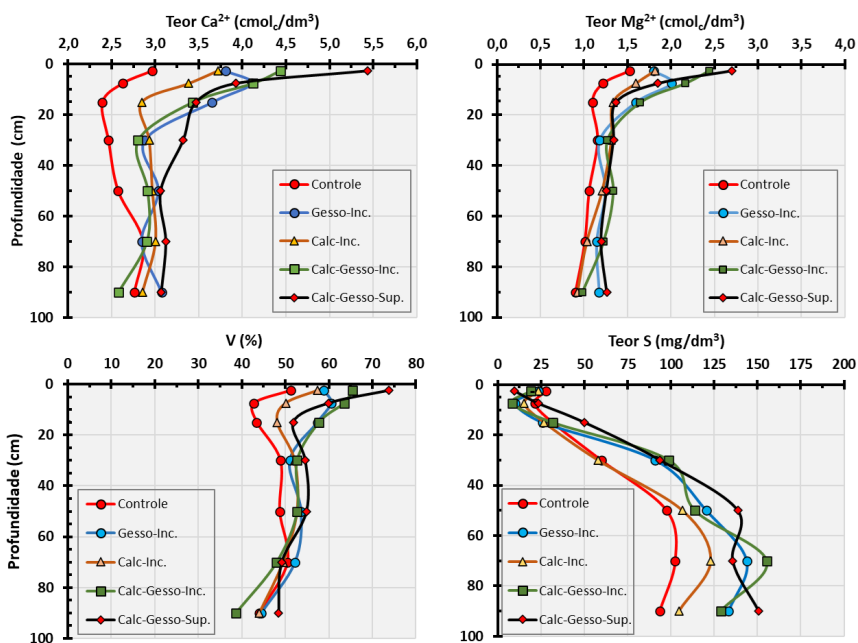


Figura 8. Efeito da aplicação de calcário dolomítico e de gesso nos teores de Ca, Mg, S e V%, em diferentes profundidades camadas de solo (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm), safra 2015/2016, Londrina-PR. Trat. 1: Controle; Trat. 2: Gesso incorporado; Trat. 3: Calcário incorporado; Trat. 4: Calcário e gesso incorporados; Trat. 5: Calcário e gesso superficiais.

Nos estudos conduzidos em Rio Verde-GO, utilizando um Latossolo Vermelho de textura argilosa (~ 450 g/kg) e CTC de $7-8$ $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$, com incorporação de calcário dolomítico objetivando elevar a saturação por bases (V) de 35% para 50% ou 70%, observou-se que a dinâmica de K no perfil de solo foi afetada pela saturação por bases. Após 3 safras de soja com a sucessão de mistura de milho e *Brachiaria ruziziensis*, em cobertura, os menores teores de K nos primeiros 20 cm de solo, na maior saturação ($V = 65\%$), podem ser atribuídos à competição pelos sítios de troca nessa camada do solo, decorrente das maiores quantidades de Ca e de Mg fornecidos pela calagem (Figura 9).

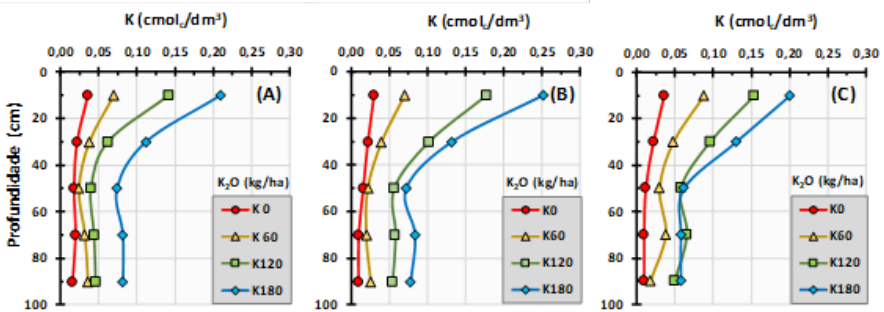


Figura 9. Teor de K trocável em camadas do solo, em função de doses do nutriente e da saturação por bases em 35% (A), 50% (B) e 65% (C), safra 2012/2013, Rio Verde-GO. Trat 1: controle, sem aplicação de K (linha vermelha); Trat 2: 60 kg/ha de K_2O (linha amarela); Trat 3: 120 kg/ha de K_2O (linha verde); Trat 4: 180 kg/ha de K_2O (linha azul).

As maiores produtividades foram obtidas com a soja cultivada em 50% e 65% de saturação por bases e dose de 60 kg/ha de K_2O na adubação. Na saturação por bases original do solo (35%), a maior produtividade também ocorreu na dose de 60 kg/ha de K_2O na adubação, com quedas de produtividade inversamente proporcionais aos aumentos de doses de K.

Não obstante a preocupação com as perdas de K por lixiviação, as Figuras 6, 7 e 9 demonstram que, em condições de manejo racional, o fenômeno não ocorre com a magnitude que muitos acreditam ou citam. A lixiviação de K é dependente de diversos aspectos físico-químicos já citados, envolvendo textura, mineralogia e teor de matéria orgânica do solo e níveis de cátions aplicados, bem como a quantidade de água percolada no perfil e o próprio manejo do sistema de produção.

Ferreira et al. (2022) monitoraram a influência de diferentes manejos de solo e combinação de culturas em sistemas de produção de algodão sobre a dinâmica e disponibilidade de K em um Latossolo Vermelho argiloso de Cerrado, em Santa Helena de Goiás-GO. Após nove safras, verificou-se que o tratamento envolvendo monocultura de algodão, em preparo convencional de solo, recebeu as maiores doses cumulativas de K, gerando excedentes mais elevados no balanço entre adubação e exportação, o que favoreceu a movimentação de K para camadas mais profundas no perfil avaliado até um metro. Em contraste, o tratamento envolvendo a rotação soja/braquiária - milho/braquiária - algodão, em plantio direto, promoveu a ciclagem e a maior recuperação de K, mantendo a maior disponibilidade nas camadas superficiais, onde constatou-se incremento no teor de matéria orgânica na camada de 0-5 cm. Assim, os efeitos aditivos decorrentes da rotação de culturas, da presença da braquiária e do plantio direto contribuíram para prevenir as perdas por lixiviação, mantendo o K em circulação no sistema, ao alcance das culturas de interesse econômico.

Contudo, as adubações potássicas em doses elevadas são um importante fator que predispõe à lixiviação de K. De acordo com Moterle et al. (2019), quando as adubações geram um balanço positivo em relação à demanda das culturas e, principalmente, quando excedem a capacidade tampão do nutriente no

solo, a elevação dos teores de K trocável favorece a lixiviação. Nesse sentido, conforme comprovado no estudo de Kaminski et al. (2010), a lógica preconizada é que, uma vez alcançado um nível de suficiência de K no solo (nível crítico de acordo com a textura ou CTC), o dimensionamento das adubações de manutenção deve acompanhar as necessidades das culturas, equivalentes à exportação nos produtos colhidos. Essa estratégia minimiza a chance de excedentes para translocação e eventual perda do nutriente no perfil do solo para abaixo da zona de exploração radicular. A eficiência da adubação de manutenção do K que garante a reposição das exportações pelos grãos de soja e sem redução dos teores de potássio trocável nos solos brasileiros é da ordem de 88% (SBCS/NRS, 2016), 80% (Oliveira Junior et al., 2020) ou no mínimo 73%, correlacionada negativamente com a CTC (Souza Junior et al., 2022).

Além das propriedades do solo, o risco de perdas de K por lixiviação também pode ser reduzido pelas boas práticas de manejo dos fertilizantes. Nas condições atuais de manejo do solo para produção de grãos, tem sido cada vez mais comum a adubação com K a lanço em pré-semeadura ou em cobertura no início do desenvolvimento das plantas. Apesar de representar um ganho operacional, em certas situações a aplicação a lanço pode ocasionar acúmulo do nutriente nos centímetros iniciais de solo (área com maiores concentrações de MO e maior CTC), e expô-lo a potenciais perdas por erosão. Nessas situações a aplicação localizada no sulco de semeadura, pode favorecer o contato do fertilizante (nutriente) com maiores volumes de solo, gerando maior aproveitamento.

Em uma revisão elaborada por Nkebiwe et al. (2016) com diversas espécies, que englobou três meta-análises (1022 conjuntos de dados de 40 experimentos entre 1982 e 2015) sobre a aplicação de nutrientes a lanço ou no sulco de semeadura,

ficou destacado que ao adicionar fontes solúveis K em sub-superfície (abaixo de 10 cm) foram observadas maiores produtividades e maiores concentrações de K em folhas e partes aéreas. Para os autores o comportamento tem relação com a maior umidade de camadas abaixo de 10 cm, que favorecem o movimento de K até as raízes, determinado majoritariamente pelo processo de fluxo em massa. Os autores destacam que por essas razões os riscos da aplicação superficial são maiores em regiões favoráveis a secas.

Por outro lado, não se faz manejo da fertilidade sem a adoção de práticas de conservação do solo. Processos erosivos e escoamento superficial podem causar grandes perdas de solo fértil e nutrientes, principalmente, em lavouras de relevo acidentado que adotam manejo a lanço em superfície de corretivos e condicionadores de solo e, também, adubações com macro e micronutrientes. Esta prática, quando rotineira, conduz à formação de um gradiente com elevada concentração de nutrientes nos primeiros centímetros da superfície do solo, passíveis de serem perdidos nos processos de erosão laminar, mesmo em solos aparentemente mais protegidos por palhada. Áreas próximas a corpos d'água também merecem atenção redobrada, uma vez que processos de eutrofização dos mananciais podem ser desencadeados pelo excesso de nutrientes, especialmente P advindo de fertilizantes.

Importância das plantas de cobertura no manejo da fertilidade e na ciclagem de nutrientes no solo

Se eu sou feito de argila, a terra inteira é meu país e todas as criaturas são meus parentes.

OmaYyah Ibn Abissalt al-Andalusi -século XI

Maalouf (2019)

Um aspecto importante da dinâmica do K no sistema solo-planta é a rápida liberação do nutriente dos restos culturais (palhada), por encontrar-se na forma iônica não associada a nenhum componente estrutural dos tecidos vegetais (Marschner, 2012). Assim, o K acumulado durante o ciclo é disponibilizado novamente no solo em curto espaço de tempo após a colheita ou dessecação das plantas (Mendonça et al., 2015). Esse processo ocorre por simples lavagem da palhada pela água das chuvas ou irrigação.

Portanto, uma boa alternativa para a ciclagem e melhoria da distribuição de K no perfil do solo é o uso da rotação de culturas, especialmente envolvendo plantas de cobertura como aveia preta ou milheto, além das braquiárias, consorciadas ou não com o milho de segunda safra após soja (Figura 10). Essa prática já vem sendo adotada em diversas propriedades agrícolas (Castro; Oliveira, 2005; Oliveira et al., 2005; Benites et al., 2010; Werner et al., 2020, 2021), inclusive com outras gramíneas forrageiras, que podem reciclar quantidades superiores àquelas exigidas pelas culturas de interesse econômico (Tabela 1 e 2).

Fotos: Ruan Francisco Firmano



Figura 10. Cultura de milho segunda safra consorciado com braquiária (A) e palhada após a colheita do milho em consórcio com braquiária *ruziziensis* (B) e sem consórcio (C). Alvorada do Sul-PR, safra 2020.

Tabela 1. Produção de biomassa, matéria seca e conteúdo de macronutrientes da parte aérea de plantas de cobertura e de culturas comerciais.

Culturas	Produção (t/ha)	N	P	K	Ca	Mg
	Matéria seca	kg/ha				
Amendoim forrageiro	4-13	214	26	122	118	66
Braquiárias	8-20	220	25	290	65	52
Calopogônio	2-6	116	11	98	36	9
Capim Sudão	15-20	90	20	260	50	20
Crotalária Breviflora	3-5	96	7	60	40	50
Crotalária Júncea	10-15	350	35	200	60	30
Crotalária Oroleuca	7-10	200	18	100	35	25
Crotalária Spectabilis	4-6	220	24	220	65	28
Crotalária+Braquiária	4,5-8	202	23	174	102	60
Crotalária+Milheto	1,5-2,4	204	25	125	41	33
Feijão de Porco	5-8	287	19	105	64	20
Lab-lab	3-9	60	20	177	164	41
Milheto	8-15	113	13,9	93	32	16
Milho	5-20	217	42	157	-	-
Mucuna preta	6-9	185	14	125	39	10
Níger	6-8	165	24	6	83	27
Puerária	4-8	177	8	75	79	22
Soja	3,5	90	11	47	45	19
Sorgo	9-19	125	17	132	29	11
Trigo Mourisco	3-6	46	11	88	29	13
Aveia Branca	7-15	130	23	340	-	-
Aveia Preta	5-10	80-130	12	200	68	20
Nabo Forrageiro	3-9	64	4,5	79	36	26
Triticale	4-7	6,8	1,7	20,6	3,3	0,4

Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2022).

Tabela 2. Produção de biomassa, matéria seca e conteúdo de macronutrientes da parte aérea de plantas de cobertura e de culturas comerciais.

Culturas	Produção (t/ha)	N	P	K	Ca	Mg
	Massa seca	kg/ha				
Girassol ¹	6,6	56	16	460	117	30
Milho ¹	6,1	67	3,4	127	21	16
Soja ¹	5,5	83	6,8	104	66	28
Trigo ¹	4-6	25	3	18	5,5	4
Mostarda indiana ²	-	112	18,2	223	116	7,2
<i>Brassica rapa</i> ²	-	90	23,7	167	167	8,8
Rabanete branco ²	-	139	32,5	265	211	10,3
<i>Raphanus sativus</i> ²	-	102	35,2	250	123	9,7
Mostarda branca ²	-	90	14,6	138	86	5,9
Lentilha ²	-	98	14,7	90	34	6,0
Ervilhaca ²	-	120	17,0	104	61	10,8
<i>Trifolium alexandrinum</i> ²	-	188	21,7	167	145	13,8
Feijão-fava ²	-	172	27,2	194	69	12,5
Vicia sativa ²	-	164	18,1	146	59	10,5
Aveia ²	-	123	22,1	215	48	10,0
Milheto ²	-	90	11,2	163	36	11,8
Sorgo ²	-	100	20,4	150	37	13,5
Niger ²	-	129	28,8	359	183	25,4
Girassol ²	-	157	30,0	258	139	30,6
Cânhamo ²	-	108	23,5	57	144	18,4
Trigo sarraceno ²	-	46	7,7	30	45	6,6
Linho ²	-	114	18,8	136	59	8,8
<i>Phacelia</i> spp. ²	-	132	30,4	361	185	7,9
Chia ²	-	116	27,5	216	113	19,9

Fonte: ¹ Embrapa Soja; ² Adaptado de Wendling et al. (2016).

Especialmente na região do Cerrado, que se caracteriza por um período seco de vários meses na época de entressafra, a possibilidade de inclusão de espécies de cobertura robustas, capazes de sobreviver em condições de déficit hídrico e aproveitar chuvas que venham a ocorrer em pós e pré-safra, constitui uma estratégia que tem conferido benefícios agrônômicos e maior sustentabilidade aos ambientes de produção de grãos. Na Figura 11, observa-se padrões de cobertura do solo na colheita do sorgo segunda safra no Cerrado de Unaí-MG, em agosto de 2019, evidenciando a presença de plantas vivas de braquiária *ruzizensis* na área de consórcio (esquerda) contrastando com a área de sorgo solteiro (direita).

Foto: Samuel Abreu



Figura 11. Cobertura do solo por ocasião da colheita do sorgo segunda safra no em Unaí-MG, com plantas vivas de braquiária *ruzizensis* na área de consórcio (esquerda) e área de sorgo solteiro (direita).

Além da maior proteção do solo contra erosão, plantas de cobertura têm arquitetura de sistema radicular distinta das espécies de plantas de interesse econômico, e podem extrair o K presente em formas menos disponíveis no solo e recuperar o nutriente aplicado via fertilizantes que eventualmente tenha se movimentado em profundidade (Figuras 6, 7 e 9). Com isso,

contribuem para a recuperação da fração trocável na camada superficial e aumento da disponibilidade de K para a cultura em sucessão, em função da produção e decomposição da palhada. O próprio conjunto de raízes também é fonte de nutrientes e ajuda a formação de um continuum de água e ar, no sentido vertical e horizontal, melhorando a qualidade estrutural do solo. Tudo isso reforça a importância do princípio de adubação de sistemas e da inclusão de plantas de cobertura na rotação de cultura das lavouras.

Resende et al. (2021) realizaram ensaios em Unaí-MG, em um Latossolo Vermelho-Amarelo muito argiloso (603 g/kg), comparando o sistema de sorgo segunda safra consorciado com braquiária *ruzizensis* e o cultivo de sorgo solteiro (Figura 11), chegando às seguintes constatações: a) introdução da braquiária impactou negativamente a produtividade de grãos do sorgo, mas promoveu incremento na quantidade de palhada e cobertura do solo; b) a quantidade de restos culturais na colheita foi 44% maior no consórcio em relação ao cultivo de sorgo solteiro, resultando em significativo ganho de produtividade da soja cultivada em sucessão; c) aos 90 dias após a colheita, a biomassa radicular coletada até um metro no perfil do sistema consorciado foi, aproximadamente, três vezes maior que no cultivo solteiro (Figura 12); d) o consórcio com braquiária resultou em acúmulo adicional de K equivalente a 87 kg/ha de K_2O na biomassa da parte aérea (acréscimo de 54% em relação ao sorgo solteiro), podendo assim ser considerado um sistema mais conservador do nutriente fornecido na adubação (Figura 13); e) a braquiária promoveu a remobilização de K no perfil, disponibilizando-o novamente em superfície após as primeiras chuvas da safra seguinte, equivalendo a um estoque de cerca de 40 kg/ha de K_2O a mais, somente na camada de 0-5 cm (Figura 14).

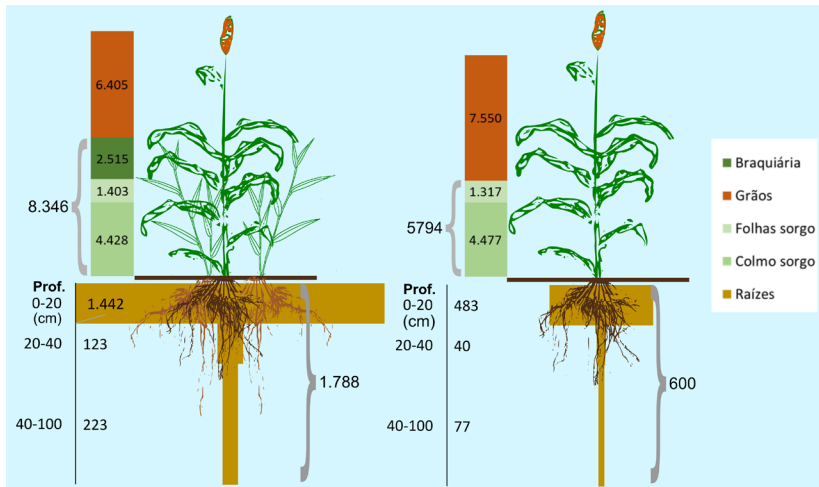


Figura 12. Produção de biomassa seca (kg/ha) de componentes da parte aérea e de raízes em sistemas de sorgo consorciado com braquiária ruziziensis e solteiro, na segunda safra 2019. Unai - MG.

Fonte: Resende et al. (2021).

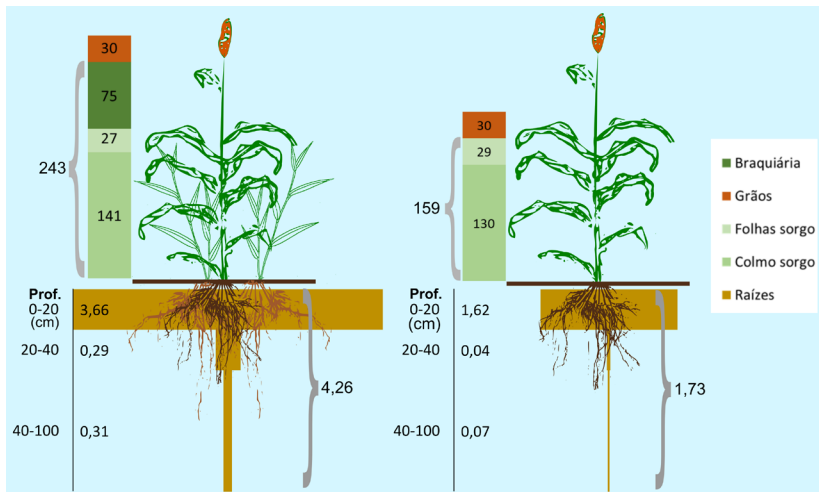


Figura 13. Alocação de potássio (equivalente K_2O , em kg/ha) na biomassa de componentes da parte aérea e de raízes, em sistemas de sorgo consorciado com braquiária ruziziensis e solteiro, na segunda safra 2019. Unai - MG.

Fonte: Resende et al. (2021).

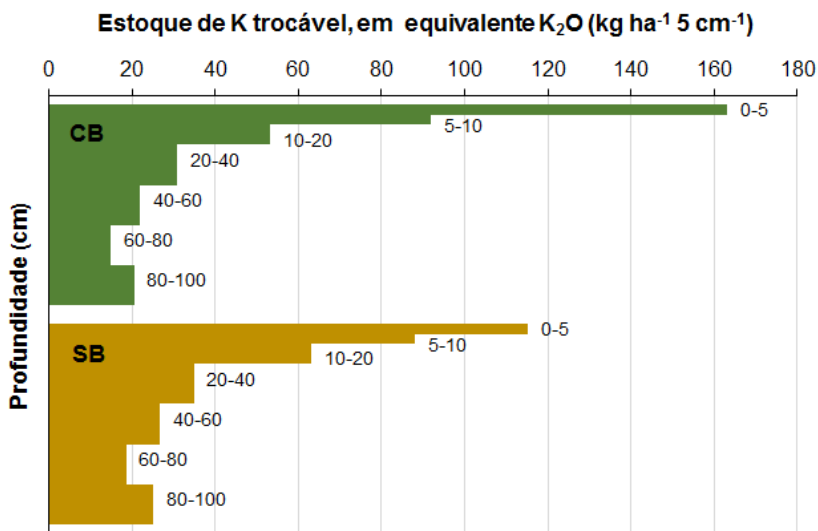


Figura 14. Estoques de K (equivalente K_2O a cada 5 cm), nas respectivas camadas de amostragem no perfil, após o cultivo de sorgo com (CB) e sem (SB) braquiária em consórcio. Amostragem em novembro de 2019. Unai - MG.

Fonte: Resende et al. (2021).

Além da quantidade de massa de raízes in situ, que melhora a estrutura do solo, a aeração e a movimentação física de nutrientes, um benefício do sistema radicular das plantas pouco lembrado diz respeito às quantidades de carbono e de outros nutrientes contidas nas raízes e distribuídas no perfil do solo. As raízes compõem ao redor de 30% da biomassa vegetal, no estágio de máximo acúmulo, representando significativa contribuição para os efeitos positivos da ciclagem de nutrientes, ainda que os teores nutricionais sejam inferiores aos verificados na parte aérea (Tabela 3).

As quantidades de nutrientes contidos nos restos culturais de plantas de cobertura e comerciais são significativas, com destaque para o N e K (Tabela 1 e 2). Assim, o acúmulo e

decomposição dos restos culturais são variáveis importantes para o processo de ciclagem e o suprimento de nutrientes às culturas sucessoras, sendo fundamental o conhecimento de sua dinâmica (Werner et al., 2021), uma vez que essas informações possibilitam aprimorar o manejo e promover a eficiência da adubação do sistema produtivo.

Tabela 3. Teores de nutrientes em raízes de soja colhidas no estágio R7 e de girassol no estágio R8 (dados obtidos em áreas de soja e de girassol em Londrina-PR).

Cultura	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Mn	Zn
	g/kg						mg/kg			
Soja	12,0	2,3	14,4	3,4	2,3	1,4	18,3	22,6	30,3	13,4
Girassol	14,3	3,1	15,4	3,0	2,4	2,1	21,2	19,4	29,0	14,6
Trigo	-	0,5	0,9	1,9	0,5	1,1	8,3	24,0	97,8	37,2

Um ponto de atenção é que, apesar da ciclagem de K atingir quantidades elevadas em sistemas intensificados de produção de biomassa, tal fato não dispensa a necessidade de adubação, devido às exportações pelas culturas. Também se deve considerar que, a priori, os estoques totais de K nos solos não são alterados pelas plantas de cobertura. A mudança significativa ocorre na compartimentalização do K em formas mais lábeis e sua alocação em camadas mais superficiais no perfil do solo, próximo à rizosfera. Por essa razão, a biodisponibilidade do K é aumentada, beneficiando o sistema como um todo e aumentando a eficiência de uso do potássio pelas culturas subsequentes, que pode permitir a redução (10 a 20%) das doses de K_2O empregadas, dependendo da(s) cultura(s) de cobertura e dos teores médios de K do solo, que devem estar acima de níveis considerados adequados.

Merecem destaque para o manejo do K, práticas inovadoras como a adubação de espécies de cobertura, que além de eficientes, otimizam aspectos operacionais da implantação da cultura sucessora de interesse econômico. Segundo Echer et al. (2020), a aplicação de K em braquiária ruziziensis, precedendo o cultivo de algodão, melhora a resposta dessa cultura ao nutriente, a produtividade e a qualidade de fibras. Os autores ainda destacam que a prática de aplicação antecipada do K na planta de cobertura, torna desnecessário o parcelamento da adubação de cobertura.

O aumento do aporte de biomassa vegetal pelas plantas de cobertura nos sistemas de produção incrementa a atividade biológica, os estoques de carbono e os teores de matéria orgânica no solo. Assim, além do efeito direto na ciclagem de nutrientes, a intensificação e diversificação vegetal nos ambientes de produção de soja também contribuem para ampliar a capacidade de retenção de K (nos coloides orgânicos), contribuindo para maior eficiência da adubação potássica (Ferreira et al., 2022). Por fim, é cada vez mais reconhecido o papel dos sistemas de produção com elevada adição anual de resíduos na mitigação de mudanças climáticas, pela incorporação e manutenção de carbono no solo e pela presença de palhada e mais raízes no perfil.

Disponibilidade de K na rizosfera e interação com microrganismos

As árvores e as flores excitam poetas e pintores, mas ninguém canta a humilde raiz, aquela outra metade, escondida no solo.

Dr. Hans Jenny (1899-1992)

As raízes das plantas exsudam diversos compostos, incluindo carboidratos, ácidos orgânicos, aminoácidos, compostos

fenólicos, enzimas, moléculas gasosas (e.g., CO_2 e H_2), e íons inorgânicos como HCO_3^- , OH^- e H^+ . Esses exsudatos estão diretamente ou indiretamente envolvidos na solubilização do K. Por exemplo, ácidos orgânicos exsudados pelas raízes ou resultantes da decomposição de resíduos orgânicos, ajudam na decomposição de minerais silicatados, liberando K que esteja em suas estruturas cristalinas (Teotia et al., 2017). Além disso, algumas espécies de Poaceae liberam fitossideróforos (aminoácidos não-proteicos), capazes de solubilizar K e $\text{Fe}_{(III)}$, aumentando suas disponibilidades para as plantas. A formação de biofilmes na superfície dos minerais, em associação com certas bactérias, é outro processo que facilita a dissolução de minerais contendo K (Balogh-Brunstad et al., 2008; Carvalhais et al., 2011).

A solubilização de K é frequentemente acompanhada pela acidificação da rizosfera, que é a região do solo próxima às raízes. A redução do pH nessa área, muitas vezes causada pela liberação de H^+ e CO_2 da respiração radicular, facilita a liberação de íons K dos minerais. Diferentes espécies de plantas têm capacidades variadas de acidificar a rizosfera; por exemplo, leguminosas são mais eficazes que cereais nesse processo devido à fixação de N_2 , absorvendo mais cátions do que ânions, resultando na liberação de prótons (Zhou et al., 2009). Além disso, os exsudatos radiculares estimulam comunidades microbianas no solo, que desempenham um papel crucial na solubilização de K.

Muitas rizobactérias e rizofungos conseguem liberar K de minerais como micas e feldspatos através de ácidos orgânicos e inorgânicos quelantes. Por exemplo, Sheng e He (2006) relataram que a solubilização de illita e feldspato por microrganismos rizosféricos está associada à produção de ácidos como 2-cetoglicônico, propiônico, málico, tartárico, cítrico, oxálico,

glucônico, succínico e fumárico, sendo que os ácidos glucônico, oxálico, 2-cetoglicônico e succínico são os mais eficientes na solubilização de K estrutural. Diversas cepas de *Bacillus* e *Pseudomonas* foram relatadas como capazes de liberar K de minerais como mica, illita, e ortoclásios, através da produção de ácidos oxálico, cítrico, fumárico e tartárico.

Além da produção de ácidos orgânicos, existem outros mecanismos pelos quais os microrganismos solubilizam K inorgânico, como a produção de sideróforos e exopolissacarídeos (EPSs), a secreção de compostos fenólicos e substâncias húmicas, e a complexação entre vários íons metálicos, como Ca, Al e Fe. No caso dos polissacarídeos, a solubilização ocorre ao se ligarem aos metais, enquanto a dissolução de silicatos é aprimorada por EPSs, extrapolissacarídeos e compostos mucilaginosos (Anjanadevi et al., 2016). Alguns fungos, como *Aspergillus*, *Penicillium* e *Fusarium*, podem solubilizar K de silicatos de Al e K através de mecanismos semelhantes aos das bactérias (Lopes et al., 2019). Esses fungos também produzem substâncias poliméricas extracelulares que adsorvem e acumulam cátions, diminuindo a saturação desses elementos. Além disso, há relatos do aumento de intemperismo de muscovita, flogopita, plagioclásio e vermiculita por fungos ectomicorrízicos, contribuindo para o aumento da disponibilidade de K no solo (Pinzari et al., 2022).

Dinâmica do K na planta

O potássio foi descoberto em 1807 pelo químico inglês Humphry Davy e já em 1860/1865 foi demonstrada sua essencialidade para as plantas pelos botânicos alemães Ferdinand Gustav Julius von Sachs (1832-1897) considerado o pai da Fisiologia Vegetal e Wilhelm Knop (1817-1891), químico agrícola e botânico.

Quando o K^+ alcança as raízes por fluxo de massa e, principalmente, por difusão (Barber, 1968), ocorre sua absorção da solução do solo para as células radiculares, a favor ou contra o gradiente de concentração do nutriente, necessitando neste caso, de gasto de energia na forma de trifosfato de adenosina (ATP) e auxiliada pela extrusão de íons H^+ (Marschner, 2012). Vários estudos demonstraram que a atividade do K influencia (Bossolani et al., 2022) e é influenciada pela concentração de outros nutrientes na solução do solo (Jakobsen, 1993) e a competição entre os cátions trocáveis do solo interfere no processo de absorção de K (Firmano et al. 2019b).

Após absorvido, o K^+ apresenta alta mobilidade interna na planta, sendo seu transporte radial mediado pelas vias do apoplasto e simplasto, até que o íon atinja a endoderme, ocorrendo então apenas a última forma de transporte (via simplástica). A transferência de K das células adjacentes até os vasos do xilema é direcionada por um processo ativo, seguindo a corrente transpiratória. A movimentação lateral de K na planta direciona parte do nutriente do xilema para o floema, principal via por onde ocorre o processo de redistribuição do nutriente, facilitada pela alta solubilidade do K em água, e fortemente relacionado com o enchimento de grãos e o comportamento fisiológico dos mesmos (Mengel, 1985).

O K está presente em elevadas concentrações no citosol e nos cloroplastos ($100-200 \text{ mmol L}^{-1}$), bem como, nos vacúolos de células-guarda. Os órgãos vegetais preferencialmente nutridos pelo floema são os tecidos meristemáticos, vagens e grãos novos. O fluxo de entrada é mais rápido e as quantidades de K absorvidas são maiores em plantas jovens e decrescem com a idade após o florescimento (Barber, 1982). O máximo acúmulo de K é verificado ao final da fase de enchimento de grãos (Figura 15), mas coincide com a maior translocação dos órgãos

vegetativos para os grãos. Além disso, as plantas em fase reprodutiva apresentam menores teores foliares de K, consequência da diminuição da atividade das raízes e também devido à redução da disponibilidade do nutriente no solo (Fageria, 1982).

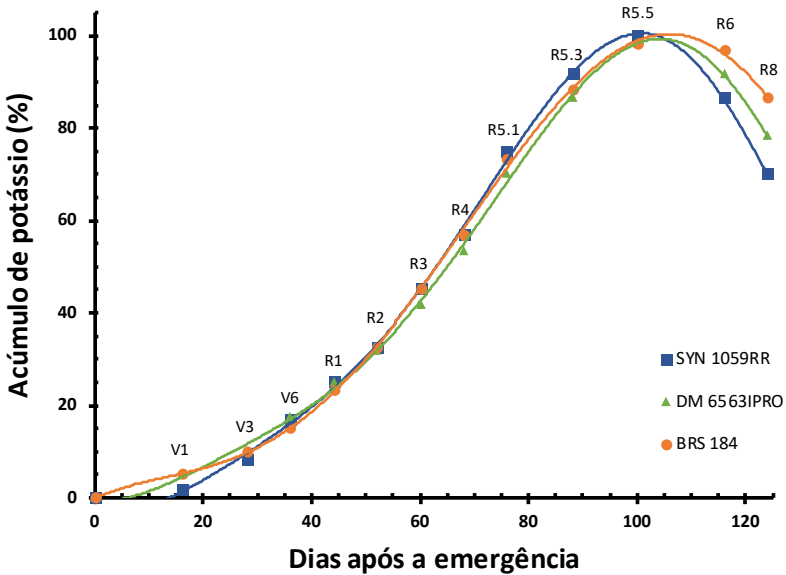


Figura 15. Marcha de absorção de potássio das cultivares de soja BRS 184, SYN 1059RR e DM 6563 Intacta RR2 IPRO™.

Fonte: Oliveira Junior et al. (2016).

Para Wyn-Jones e Pollard (1983), o K^+ é o principal cátion no citoplasma e está envolvido em vários processos fundamentais e integrados no metabolismo das células. Dentre suas funções, o íon atua na ativação enzimática e síntese, manutenção e estabilização da estrutura funcional das proteínas, na regulação da abertura e fechamento dos estômatos e, também, no ajuste osmótico dos tecidos, processos fundamentais para o controle de água nas plantas (Epstein; Bloom, 2006; Malavolta, 2006).

Segundo Bhandal e Malik (1988) outros indicativos da importância do K na fisiologia celular são os tipos de RNA e DNA sintetizados, bem como, a rotatividade de aminoácidos no citoplasma. Análises multivariadas indicam que 19 rotas metabólicas e 51 compostos são regulados pela disponibilidade de K (Cotrim et al., 2023). Em plantas de soja bem nutridas, teores elevados de K nos grãos são indicativos de alta síntese proteica e qualidade do produto. Em plantas malnutridas e em condições de deficiência de K, no entanto, as alterações no metabolismo celular promovem a redução na síntese e na atividade enzimática da redutase do nitrato, com acúmulo de compostos nitrogenados e de carboidratos solúveis (Hafsi et al., 2014; Parveen et al., 2021). Tais alterações podem contribuir para o maior ataque de pragas (Datnoff, 1994; Amtmann et al., 2008) e doenças (Huber, 1980, 1989), representados na Figura 16.

Elaboração: Ruan Francisco Firmiano

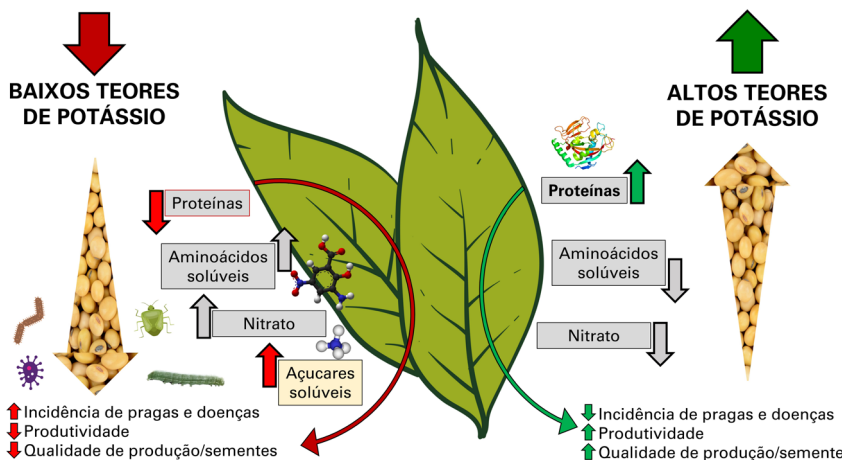


Figura 16. Principais relações entre a síntese proteica e os teores de K nos grãos.

O adequado fornecimento de K às plantas está diretamente relacionado à resistência das plantas à seca, especialmente por meio da homeostase osmótica, que ocorre pela manutenção do turgor celular e pressão osmótica (Levi et al., 2011). Outros processos também são fundamentais na economia de água promovida pelo K, como: i) o controle da condutância de água e transpiração (Benlloch-González et al., 2010); ii) regulação dos potenciais de membrana (Schroeder; Fang, 1991); iii) controle estomático (Talbot e Zeiger, 1996); iv) melhoria da condutividade hidráulica em raízes (El-Mesbahi et al., 2012); e v) homeostase iônica (Su et al., 2001).

O valor nutricional da soja e seus derivados é um assunto relevante para a qualidade da matéria prima utilizada na cadeia de produção de proteína animal, e está diretamente relacionado com a adubação potássica. Os grãos de soja acumulam e promovem uma elevada exportação de K das lavouras, em média 18 kg/t de grãos (~22 kg/t de K_2O) (Oliveira Junior et al., 2020), concentração muito superior aos valores observados para as demais culturas de grãos, como trigo, milho, feijão e girassol, conforme será abordado no item 7.

Não obstante a importância do K no desenvolvimento vegetativo da soja, no potencial produtivo e na qualidade dos grãos, a relação com outros nutrientes também é fundamental. Nesse sentido, o K pode interferir na absorção e nas interações com outros nutrientes nas plantas, como o Ca e o Mg, por exemplo, podendo não só a falta, como o excesso de qualquer um desses cátions, ser impeditivo para a obtenção de elevadas produtividades.

Observa-se na Figura 17, obtida a partir de experimento conduzido em Londrina-PR, com doses de K em solo de textura argilosa (~750 g/kg de argila), o efeito competitivo da absorção e do acúmulo crescente de K nas folhas de soja, em resposta ao aumento da adubação potássica, sobre os teores de Ca e

de Mg nas folhas (estádio R2). As maiores produtividades foram obtidas quando os teores foliares de K se mantiveram no intervalo de 18 a 24 g/kg. Verifica-se, assim, que a deficiência nutricional pode ser induzida pelo desequilíbrio entre os cátions trocáveis do solo. Portanto, a determinação da dose certa da adubação é fundamental para garantir um elevado potencial produtivo.

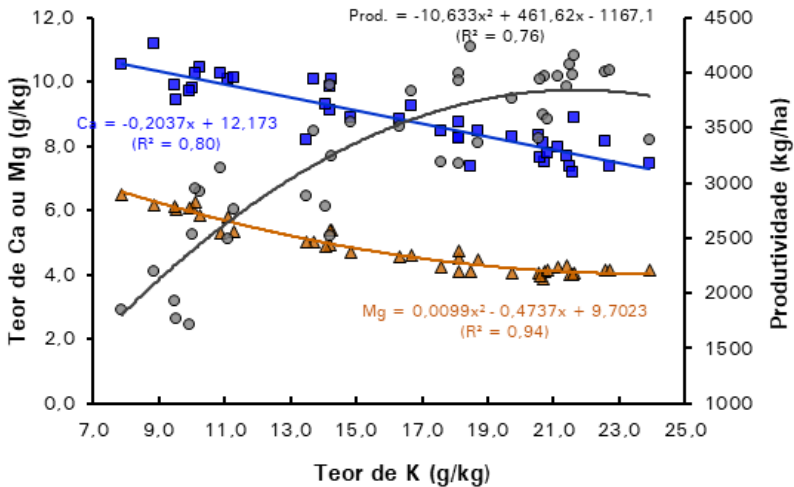


Figura 17. Relações entre os teores de K, Ca e Mg nas folhas de soja (estádio R2), e produtividade de soja, decorrentes de doses de K na adubação. Londrina-PR, safra 2015/2016.

Importância da análise de solo e de tecido vegetal

A interpretação inadequada de qualquer fenômeno é um passo certo para todo tipo de credice e a base para uma tomada de decisão equivocada.

Análise de solo

As plantas seriam como animais invertidos, com a boca enfiada na terra, de onde retirariam seu “alimento”.

Aristóteles (384 a 322 a.c)

Entre as causas do aumento da ocorrência de desequilíbrios nutricionais, destacam-se as falhas de monitoramento da fertilidade do solo e da nutrição mineral das plantas, seja por falta de representatividade das amostras ou de regularidade desta avaliação. Outro problema é que os resultados das análises de solo nem sempre são utilizados adequadamente como ferramenta de interpretação da disponibilidade de nutrientes e/ou da necessidade de adubação e correção do solo.

Análises de solo e de tecido foliar devem ser práticas rotineiras. O investimento em monitoramento e diagnóstico técnico precisos aumenta a assertividade da tomada de decisão e, como resultado, o manejo equilibrado da adubação evita aplicações ineficientes de fertilizantes e gera ganhos de produtividade. O lucro desperdiçado com a redução do potencial produtivo das áreas subfertilizadas e visualmente deficientes, bem como das áreas adubadas em excesso com fórmulas padronizadas ou doses fixas, em geral, retorna o investimento com as análises, seja por redução dos custos variáveis de produção ou pela racionalização da adubação para máxima eficiência técnica e econômica.

Os parâmetros adequados para a interpretação da fertilidade do solo e para a recomendação de manejo da adubação são regionalizados, de acordo com as características do ambiente edafoclimático, e específicos conforme a cultura e o potencial do material genético. A interpretação e as decisões de manejo decorrentes devem ser embasadas em resultados de pesquisa, denominados ensaios de calibração de resposta à adubação, que determinam o potencial produtivo e o retorno técnico e econômico da adubação para cada classe de disponibilidade do

nutriente no solo. No Brasil, a pesquisa agropecuária já disponibilizou diversos manuais regionais de suporte à interpretação de análises de solo e de folhas, com as respectivas recomendações para controle da acidez e ajustes nos níveis de nutrientes disponíveis no solo, bem como para o dimensionamento das adubações de manutenção e nutrição equilibrada de diferentes culturas (Oliveira et al., 2023).

Na Figura 18 observa-se uma coleta de solo com trado holandês que, no entanto, poderia ser feita com diferentes tipos de equipamentos e estratégias de amostragem. O importante é que, independentemente da ferramenta de coleta de solo e tecnologia utilizada, a amostra deve ser representativa do talhão e da profundidade que se pretende caracterizar.

Fotos: Fabio Alvares de Oliveira (A),
Ruan Francisco Firmano (B)



Figura 18. Coleta manual de solo com trado holandês e identificação da amostra do talhão (A), e coleta com quadriciclo, com destaque para o mecanismo de coleta utilizando broca de acionamento hidráulico (B).

Os resultados de análise química de solo refletem a condição da fase trocável (superfície das argilas e solução do solo) e, portanto, indicam a fração mais prontamente biodisponível dos nutrientes contidos no solo. Os métodos analíticos de determinação laboratorial (Camargo et al., 2009; Teixeira et al., 2017) apresentam elevada correlação com esta fração e refletem, com boa precisão, as ações de manejo da fertilidade implementadas no talhão amostrado.

Em experimento conduzido em Balsas-MA (Figura 19), buscou-se avaliar a dinâmica do K no solo e sua recuperação pelo extrator Mehlich 1, em resposta à aplicação de fertilizante potássico em Neossolo Quartzarênico (100 g/kg de argila e CTC: 2,80 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$) e em Latossolo Amarelo (300 g/kg de argila CTC: 8,26 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$). Foi utilizado um sistema fechado e controlado para evitar perdas de K por lixiviação e/ou escoamento superficial, e verificou-se que a relação entre o K aplicado e os respectivos teores trocáveis foram similares à relação teórica calculada. Tal comportamento demonstra que o K trocável, estimado pela análise de solo, é um bom indicador da disponibilidade deste nutriente no solo. Entretanto, deve-se considerar que a interpretação mais adequada destes valores em classes de disponibilidade é dependente dos atributos do solo que determinam sua capacidade tampão, fortemente correlacionada com a CTC (e.g. tipo e teor de argila, teor de matéria orgânica).

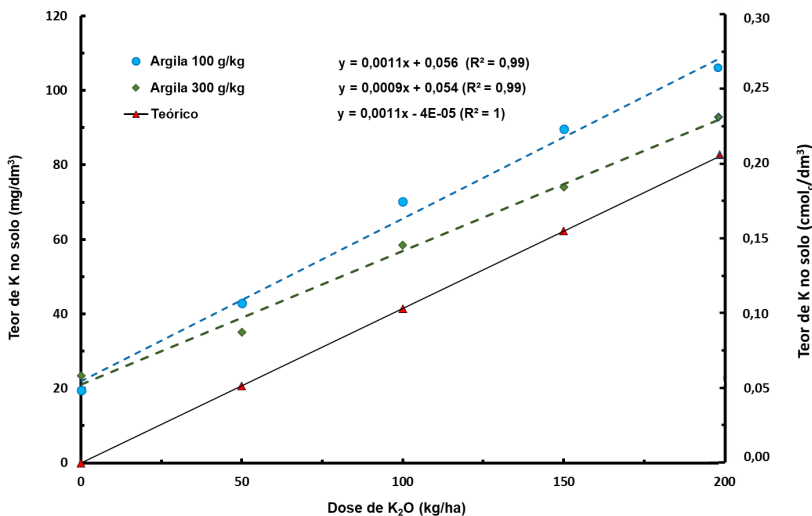


Figura 19. Valores teóricos e reais de teores de K trocável (Mehlich-1) em função de doses de K₂O na forma de cloreto de potássio. Amostragem e análise química realizadas 130 dias após a aplicação do fertilizante potássico em Neossolo quartzarênico (100 g/kg de argila) e em Latossolo Amarelo (300 g/kg de argila). Balsas-MA.

Um ponto que merece atenção é a variação regional quanto aos métodos oficiais de análise e a respectiva interpretação dos resultados obtidos em laboratório. Para o K, os principais extratores utilizados no Brasil para a determinação da fração trocável no solo (Mehlich-1, Resina trocadora de íons e Mehlich-3) têm alta correlação entre si (Antonangelo et al., 2019; Firmano et al., 2019a). Ainda assim, é importante conhecer qual extrator foi utilizado na análise, pois os limites entre classes de interpretação dos resultados (divisão entre teores muito baixo, baixo, médio e alto) variam conforme o extrator e, consequentemente, alteram as tabelas de recomendação de adubação potássica.

De forma geral, os níveis críticos (NCs) de K no solo estão bem estabelecidos e consideram as condições edáficas, e até mesmo a evolução do potencial genético das culturas, para o ajuste da demanda nutricional associada à expectativa de produção (Tabela 4). O valor de NC serve como referência para aferir se uma área de cultivo apresenta condições adequadas de fertilidade do solo (Resende et al., 2016). Se o teor de K na análise for superior ao NC, a estratégia mais eficiente de adubação é a reposição das quantidades exportadas nas colheitas para manutenção da fertilidade.

Porém, quando a análise indica teor abaixo do NC, há necessidade de investimento para “construir” reservas no solo e o dimensionamento das próximas adubações deve prever uma quantidade do nutriente maior do que a extraída pelas culturas. Tal procedimento permite incrementar gradualmente a disponibilidade no solo, o que reforça a importância de se realizarem amostragem e análise periódica para o monitoramento da fertilidade. Em princípio, não existem desvios significativos no modelo de adubação e, portanto, os valores de NCs devem ser utilizados para interpretação da fertilidade do solo e para a recomendação das doses adequadas de K na adubação.

Tabela 4. Indicações de níveis críticos (NCs) de K no solo conforme diferentes fontes de consulta e regiões do Brasil.

Região	Referência	Extrator	CTC $\text{cmol}_c^{\text{pH } 7}/\text{dm}^3$	Nível crítico K
Paraná	Manual [...] (2019).	Mehlich-1	-	0,21 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$
São Paulo	Mattos Junior et al. (2022)	Resina de Troca Iônica	-	1,6 $\text{mmol}_c/\text{dm}^3$
Minas Gerais	CFSEMG (1999)	Mehlich-1	-	70 mg/dm^3
Cerrados	Sousa e Lobato (2004)	Mehlich-1	< 4	40 mg/dm^3
			> 4	80 mg/dm^3
Rio Grande do Sul e Santa Catarina	Manual [...] (2016).	Mehlich-1	< 7,5	60 mg/dm^3
			7,5 - 15,0	90 mg/dm^3
			15,0 - 30,0	120 mg/dm^3
			>30,0	135 mg/dm^3

No Brasil existem várias tabelas regionalizadas de interpretação de análise de solo e de recomendação de calagem e de adubação para a cultura da soja (Oliveira Junior et al., 2020). Para utilização dessas tabelas, deve-se observar as diferenças entre elas, que são decorrentes de tipos de solo, condições climáticas, cultivares, métodos de extração e dos procedimentos laboratoriais, bem como dos diferentes trabalhos de calibração efetuados para a cultura da soja.

É interessante observar que no Brasil existem redes oficiais de laboratórios credenciados de análises de solo e de tecido vegetal que atendem as principais regiões agrícolas do País. Coordenados por instituições vinculadas à Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), são executados os ensaios de proficiência agrônômica, com amostras de referência analisadas por todos os laboratórios participantes da rede, o que possibilita a avaliação comparativa de cada laboratório em relação

ao intervalo de confiança da média de todos os participantes. Os principais programas são identificados a seguir:

- Comissão Estadual de Laboratórios de Análises Agronômicas (CELA-PR): <https://sbcs-nepar.org.br/cela/>
- Instituto Agronômico de Campinas (IAC): http://lab.iac.sp.gov.br/laboratorios_participantes.html
- Programa de Análise de Qualidade de Laboratórios de Fertilidade (PAQLF): <https://www.embrapa.br/en/solos/paqlf>
- Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e de Tecido Vegetal (ROLAS): <https://rolas.cnpt.embrapa.br/publico/plIndex>
- PIATV-Programa Interlaboratorial de Análise de Tecido Vegetal (Esalq/USP): <http://www.piatv.com.br/>

Análise de tecido

A agilidade no diagnóstico e o tratamento precoce são as principais ferramentas para iniciar uma terapia eficaz e aumentar as chances de sucesso e cura. Quanto mais precoce o diagnóstico de uma doença, maior a possibilidade de sucesso do tratamento.

A diagnose foliar é uma metodologia de análise que reflete as quantidades de nutrientes disponíveis no solo, e tem relação com condições adversas que afetam a absorção de nutrientes, como acidez, doenças radiculares, apoxia, compactação, entre outras. No meio científico, costuma-se dizer que a planta é o melhor “extrator” para se avaliar a real disponibilidade dos diversos nutrientes no ambiente de cultivo. Apesar de apresentar parâmetros de referência bem estabelecidos, sua utilização para o diagnóstico de lavouras é muito pequena, desperdiçando uma ferramenta eficiente para avaliação do estado nutricional.

Basicamente, a diagnose foliar consiste em determinar os teores totais de nutrientes nas folhas, no momento de máxima atividade fisiológica e, portanto, máxima demanda nutricional, e interpretar os resultados classificados em faixas de suficiência. No entanto, a composição nutricional do tecido vegetal apresenta natureza dinâmica, variando com a idade e partes da planta (Beverly, 1993), condições climáticas (Walworth; Sumner, 1987) e equilíbrio da disponibilidade de nutrientes no solo (Muniz, 1982). Além disso, o balanço de nutrientes acumulados nas plantas interfere na absorção e no teor crítico dos nutrientes (Bates, 1971; Bailey et al., 1997). Por esta razão, a relação entre os teores de nutrientes tem sido utilizada para caracterizar condições adequadas para a obtenção de elevadas produtividades por métodos como o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) (Beaufils, 1973; Wadt et al., 1998; Reis Junior; Monnerat, 2003; Kurihara, 2004) e a Diagnose da Composição Nutricional (CND) (Parent; Dafir, 1992; Kurihara, 2004).

Na diagnose foliar, a amostragem é a fase mais crítica, já que a amostra deve representar a condição média da população de plantas da lavoura, quanto à condição fisiológica e ao estado nutricional. Assim, o plano de amostragem deve ser criterioso, considerando a uniformidade genética e de manejo da adubação do talhão, o tipo de crescimento determinado ou indeterminado e o estágio de desenvolvimento. Atenção especial deve ser dada para a coleta de folhas realizada após qualquer pulverização foliar, uma vez que diversos produtos fitossanitários podem conter nutrientes em sua formulação, “contaminando” os resultados da análise sem que tais nutrientes tenham sido realmente assimilados pelas plantas. Nesse caso, o falso aumento dos teores foliares poderá trazer interpretações incorretas, principalmente pelos métodos DRIS e CND.

O estudo denominado como marcha de absorção de nutrientes possibilita a determinação das taxas de acumulação de nutrientes nos tecidos vegetais, durante o desenvolvimento das plantas. Em geral, as cultivares de soja TCD (ciclo determinado) apresentam a taxa máxima de acúmulo de nutrientes do início do florescimento ao florescimento pleno (estágios R1 e R2), que representa a época ideal de amostragem de folhas, conforme Figura 20A.

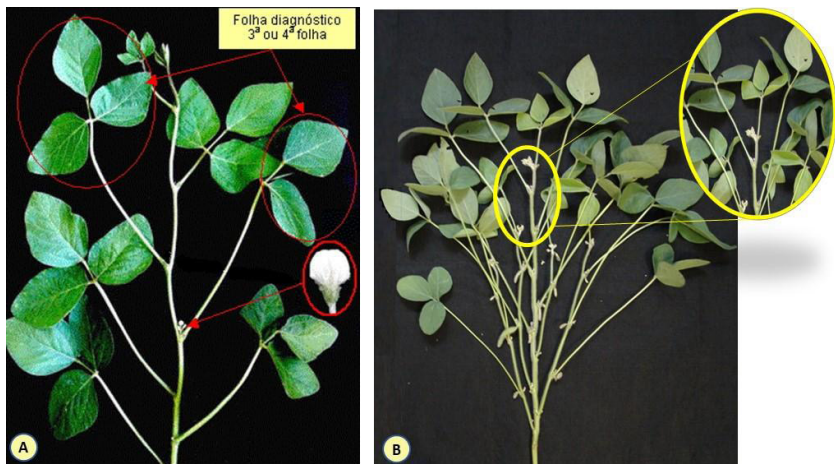


Figura 20. Indicação de momento de amostragem para análise foliar. Planta de soja com tipo de crescimento determinado (TCD) no início do florescimento (A) e planta de soja com tipo de crescimento indeterminado (TCI) em V10, coincidindo com pleno florescimento (B).

Fotos: Cesar de Castro e Adilson de Oliveira Junior.

Entretanto, os trabalhos conduzidos na Embrapa Soja para aferição dos parâmetros nutricionais para os cultivares de soja TCI, verificaram que a maior taxa média de acúmulo de nutrientes, e que representa a condição ideal para a avaliação do estado nutricional das plantas pela análise foliar, ocorreu entre 56 e 66 dias após a emergência (Figura 21). Assim, o estágio

fenológico adequado para a amostragem e diagnose foliar nas cultivares de soja TCI é florescimento pleno (R2), podendo-se estender esta amostragem até o início do estágio R3, para coincidir com o desenvolvimento vegetativo no intervalo entre V8 e V10, ou seja, plantas com 8 a 10 nós (Figura 20B).

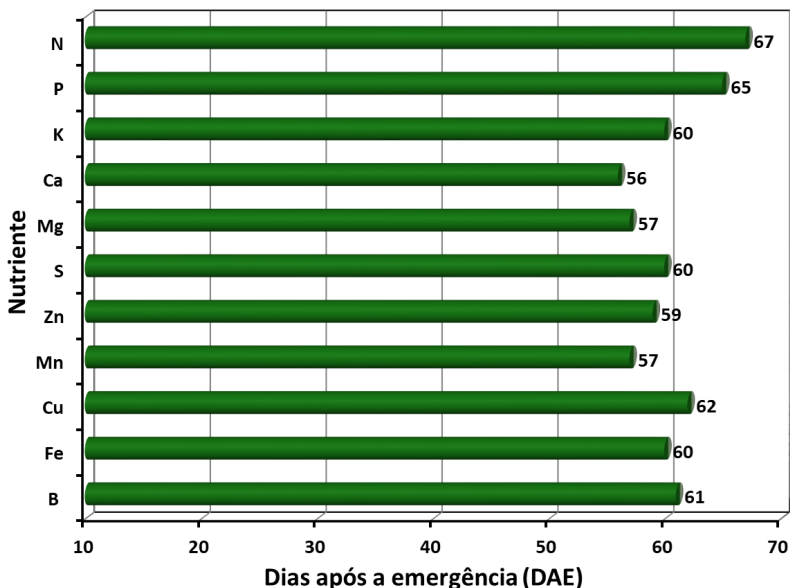


Figura 21. Data de ocorrência da maior taxa de acúmulo diário de nutrientes no tecido foliar da soja TCI.

Além do estágio fenológico da soja ideal, é importante definir e padronizar a folha diagnóstica que deve ser coletada para representar o estado nutricional das plantas. Os teores dos nutrientes nas folhas variam durante o desenvolvimento das plantas e, também, em função da idade fisiológica da folha, determinada pela posição na haste principal da planta. Assim, deve-se coletar as recém-maduras e completamente desenvolvidas, que são as folhas fisiologicamente mais ativas e, de

forma prática, geralmente apresentam-se como a terceira ou quarta folha a partir do ápice das plantas (Figura 20).

Em um estudo conduzido a campo em Balsas-MA, avaliou-se o conteúdo de K nos trifólios superiores, coletados em diferentes estádios de desenvolvimento e analisados separadamente, corroborando que os trifólios 3 e 4 (3ª e 4ª folhas a partir do ápice) são os mais adequados para avaliação do estado nutricional da soja no estágio R2 (Figura 22).

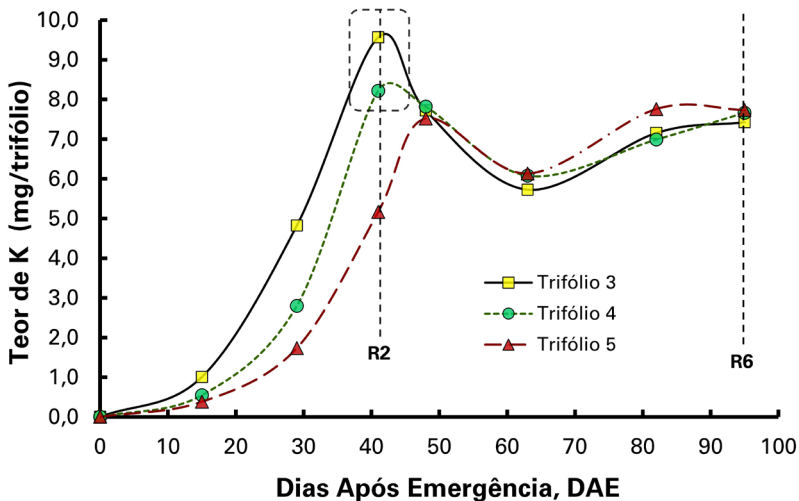


Figura 22. Conteúdo foliar de K ao longo do ciclo da soja TCD (BRS Sambaíba) cultivada em Latossolo Amarelo (350 g/kg de argila), conforme a posição dos trifólios amostrados na planta. Balsas-MA, safra 2000/2001.

Para a cultura da soja, padronizou-se a coleta de trifólios, sem o pecíolo, de um montante mínimo de 25 plantas por talhão homogêneo. Na Tabela 5, são apresentadas as classes de teores utilizadas para a interpretação da análise foliar de soja, tanto cultivares TCD quanto TCI. Oliveira Junior et al. (2020) apresentam outras tabelas com parâmetros e indicações regionais para a interpretação da análise foliar da cultura.

Tabela 5. Classes de teores de nutrientes para interpretação dos resultados das análises de folhas¹, sem pecíolo, de soja de tipos de crescimento determinado e indeterminado.

Nutriente	Baixo	Adequado ²	Alto
	g/kg		
N	< 45,0	45,0 a 65,0	> 65,0
P	< 2,8	2,8 a 4,5	> 4,5
K	< 18,0	18,0 a 25,0	> 25,0
Ca	< 6,0	6,0 a 10,0	> 10,0
Mg	< 2,8	2,8 a 5,0	> 5,0
S	< 2,4	2,4 a 4,0	> 4,0
	mg/kg		
B	< 40	40 a 60	> 60
Cu	< 6	6 a 12	> 12
Fe	< 90	90 a 180	> 180
Mn	< 70	70 a 150	> 150
Zn	< 30	30 a 45	> 45

¹Terceiro ou quarto trifólio sem o pecíolo, a partir do ápice da haste principal, coletado no estágio R1/R2 (TCD) e R2/R3 - V8/V10 (TCI). ²Intervalo de teores interpretado como adequado corresponde à "faixa de suficiência" para fins de diagnose foliar.

Sintomatologia da deficiência de potássio

Em nutrição de plantas, como em medicina, tratar sem diagnosticar é procedimento desaconselhado, mas o pior é diagnosticar errado.

Fontes (2011)

Não é porque dois eventos acontecem ao mesmo tempo que estão necessariamente interligados ou que haja uma relação de causa-efeito entre eles. Correlação não implica, necessariamente, em causalidade.

Segundo Epstein e Bloom (2006), em função da alta mobilidade do K e da sua capacidade de redistribuição na planta, os sintomas de deficiência surgem inicialmente nas folhas velhas. Em condições de campo, sintomas visuais de deficiência de K iniciam-se com clorose (Figura 23) seguida de necrose nas margens e pontas das folhas velhas (Beringer; Nothdurft, 1985; Borkert et al., 1994). Verificam-se também alterações metabólicas associadas à deficiência de K nas folhas, como o aumento nos teores de putrescina (Malavolta, 2006) e a redução severa da atividade fotossintética (Marschner, 2012). Para Singh e Reddy (2017), o acúmulo de K nos tecidos foliares apresenta relação diretamente proporcional com a eficiência do metabolismo fotossintético e, sob severa deficiência de K, ocorre redução drástica do crescimento e da produtividade das plantas.

Fotos: Ruan Francisco Firmano

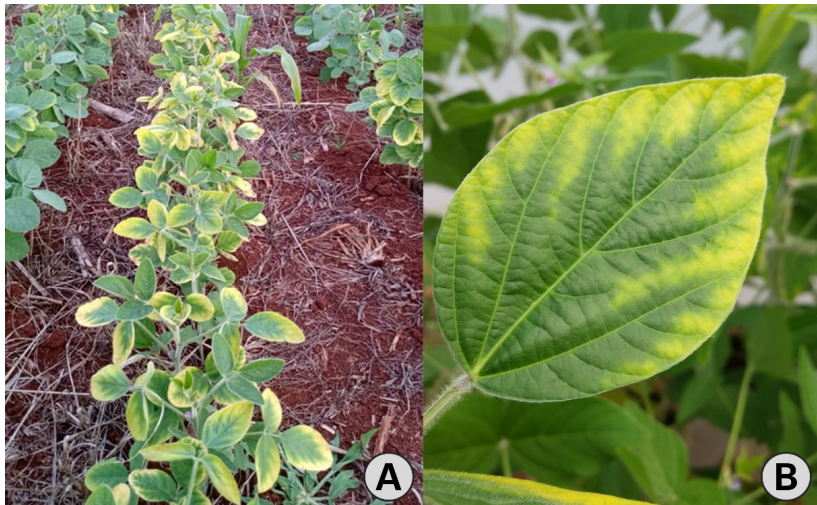


Figura 23. Plantas com sintomatologia de deficiência de K em fase inicial do desenvolvimento (A) e avanço da clorose nos bordos de um trifólio de soja causada pela deficiência de K (B). Londrina-PR, 2015.

A membrana plasmática da epiderme radicular é o primeiro componente anatômico que sinaliza a deficiência de K, com posterior transdução ao citoplasma. A partir disso, uma série de reações bioquímicas e fisiológicas são iniciadas, gerando respostas a longo e curto prazos (Wang; Wu, 2017). Os principais sinalizadores a curto prazo (poucas horas) são alterações no potencial de membrana, aumento de espécies reativas de oxigênio e fitohormônios. A queda dos teores de K no citoplasma costuma ocorrer apenas dias após a exposição da planta a condições limitantes.

Quando a deficiência de K é mais severa, os sintomas iniciam-se ainda no período vegetativo, com o aparecimento de mosqueados amarelados nas bordas dos folíolos das folhas da parte inferior da planta. Essas áreas cloróticas avançam para o centro dos folíolos, seguindo-se, então, de necrose das áreas mais amareladas, nas bordas dos folíolos, com o aumento progressivo do sintoma.

Segundo Borkert et al. (2005), com a evolução da deficiência, a necrose avança para o centro dos folíolos e, finalmente, as áreas necrosadas ficam secas e quebradiças, deixando os folíolos com o aspecto de esfarrapado. Esta dinâmica da deficiência de K, mais frequente em condições de campo (Figura 24), basicamente descreve a evolução dos sintomas de deficiência de K em soja durante a fase vegetativa e em soja de tipo de crescimento determinado (TCD).

Foto: Fábio Alvares de Oliveira

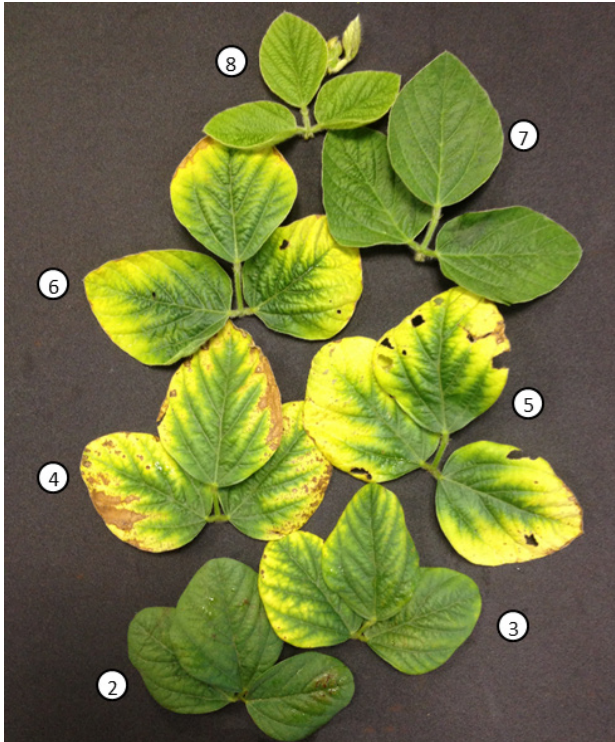


Figura 24. Dinâmica de aparecimento e avanço da deficiência potássio em soja durante a fase vegetativa (V8).

Contudo, Oliveira Junior et al. (2013) observam que tem sido muito frequente a ocorrência de sintomas visuais de deficiência de K em soja de tipo de crescimento indeterminado (TCI). Neste caso, os sintomas característicos do desequilíbrio nutricional iniciam-se durante o estágio reprodutivo e não se distribuem seguindo um gradiente na planta, ocorrendo de forma compartimentalizada. Nestas plantas de soja TCI, é possível perceber que os sintomas são mais destacados nas folhas do terço superior, além de ocorrerem mais tardiamente. Isto ocorre

porque, mesmo após o florescimento, a gema terminal continua em atividade vegetativa simultaneamente à fase reprodutiva da planta. Com isso, ao mesmo tempo tem-se vagens em granação no terço médio, vagens em formação, flores e folhas novas distribuídas nos ramos da planta, sobretudo nos nós superiores, afetando a relação fonte-dreno da planta (Figura 25).

Foto: César de Castro



Figura 25. Planta de soja TCL com flores e vagens no terço médio e, também, com flores no último nó.

Com o desenvolvimento da cultura da soja, o fluxo de transporte de K para as partes vegetativas (caule, ramos e folhas) diminui acentuadamente, ao passo que o fluxo de transporte de K para as vagens intensifica-se rapidamente, tornando as estruturas reprodutivas o principal dreno de K absorvido do solo e remobilizado a partir das partes vegetativas (Sallam et al., 1985). O desequilíbrio na relação fonte-dreno entre partes vegetativas e reprodutivas da planta, com priorização da nutrição dos órgãos reprodutivos, impede que as folhas novas em desenvolvimento sejam supridas adequadamente em K e, principalmente em solos com teores baixos do nutriente, os sintomas de deficiência expressam-se mais facilmente.

Essa dinâmica do K em plantas de soja TCI se assemelha ao que ocorre no algodoeiro, cujas plantas também manifestam sintomas de deficiência de K em folhas novas próximas às maçãs, as quais funcionam como forte dreno de K (Malavolta, 2006).

Outro sintoma em lavouras cujo manejo do solo e adubação apresentam balanço negativo de K em relação à demanda nutricional das culturas, é a murcha acelerada das plantas em épocas de veranicos. Isto ocorre devido ao desequilíbrio osmótico causado pela carência de K nas células-guarda dos estômatos, onde normalmente sua concentração é maior, diminuindo a velocidade do fechamento dos estômatos e aumentando a perda de água da planta (Läuchi; Pflüger, 1978). Em geral, este sintoma associado à deficiência do metabolismo de ajuste osmótico, dependente do íon K^+ , ocorre em reboleiras com maiores limitações na disponibilidade de K.

Apesar do processo de absorção ser específico e seletivo, podem existir relações favoráveis ou desfavoráveis, entre os íons. Um nutriente exerce sinergismo quando favorece a absorção de outro, como a ação do fósforo (P) aumentando a

absorção do molibdênio (Mo). Já um efeito antagônico, ou desfavorável, ocorre quando a absorção de um nutriente é limitada pela presença de outro, independente da concentração na solução do solo, tal como observado entre o cálcio (Ca) e o cobre (Cu). Em determinadas circunstâncias, como no exemplo anterior, o efeito antagônico pode ser benéfico à planta, por exemplo, reduzindo o risco de toxidez (Malavolta, 2006).

Outra relação importante é a inibição que também consiste na diminuição da absorção de um íon, provocada pela presença de um outro íon. Algumas interações são bem conhecidas e podem ser de dois tipos: competitiva, como as interações existentes entre Ca vs Mg vs K, dependentes do equilíbrio de concentração no solo e no interior da planta, ou não competitiva, como a deficiência do cátion zinco (Zn^{2+}) induzida pelo ânion fosfato ($H_2PO_4^-$), quando os nutrientes não competem pelo mesmo sítio de absorção.

O conhecimento destas interações é importante para o manejo da adubação e da calagem, pois o desequilíbrio acentua o efeito da inibição competitiva exercida por K^+ e Ca^{2+} , induzindo a redução na absorção de Mg^{2+} na planta. Estes três cátions competem mutuamente pelos sítios de adsorção de cargas negativas nos coloides do solo, assim como pelos canais de transporte através da membrana plasmática das células da epiderme no processo de absorção radicular.

Assim, a aplicação de doses elevadas de corretivos de acidez ou de fertilizantes potássicos devem ser planejadas com base no diagnóstico correto da fertilidade do solo, pois o consumo de luxo de um nutriente poderá interferir negativamente na absorção de outro. Na Figura 26, as folhas coletadas em área comercial de soja apresentaram sintomas leves de deficiência de K, principalmente clorose internerval. Após levantamento do histórico de manejo da fertilidade do solo, foi constatado o uso frequente de calcário dolomítico, para elevação da saturação por bases acima de 70%, e adubação potássica deficiente.

Foto: Adilson de Oliveira Júnior

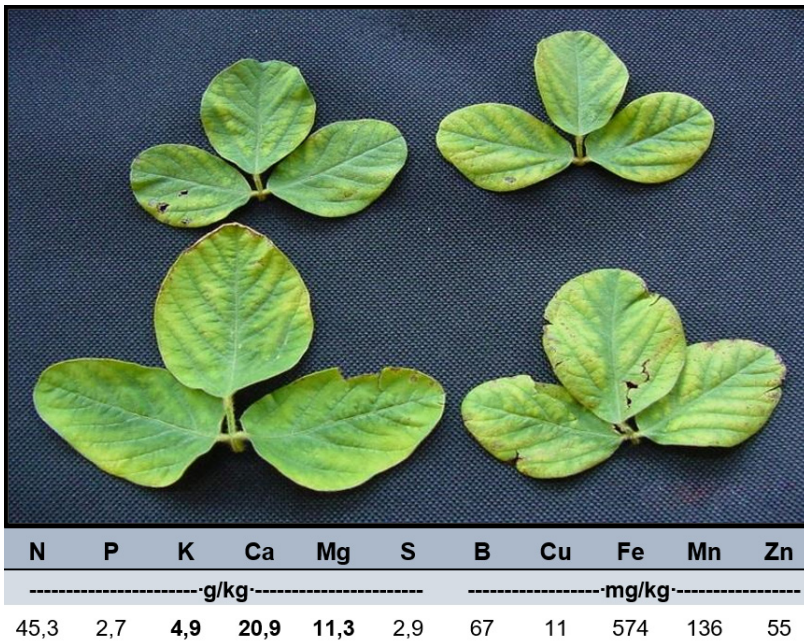


Figura 26. Folhas de soja com sintomas de deficiência de K em função da presença de elevados teores de Ca e Mg no solo. Cândido Mota-SP, 2004.

A análise dos tecidos foliares de plantas com os sintomas visuais revelou forte desequilíbrio nutricional. Os teores foliares, independentemente do estágio de desenvolvimento das plantas, apresentavam-se muito baixos para o K e muito altos para Ca e Mg, indicando um claro desbalanço entre os três nutrientes, provocado pelo manejo da adubação e da calagem.

Em safras recentes, plantas de diversas lavouras foram encaminhadas à Embrapa Soja, com o objetivo de diagnosticar as causas dos sintomas de clorose e queima de bordos foliares, em folhas novas, posicionadas em nós próximos às flores e vagens em formação, no terço superior das plantas (Figura 27). Apesar da sintomatologia típica de deficiência de potássio, os agricultores ou responsáveis técnicos pelas lavouras somente se convenceram dos erros cometidos no manejo da adubação,

a partir dos resultados analíticos que confirmaram a deficiência severa de K nas folhas sintomáticas, em geral muito abaixo dos teores críticos para o nutriente, independentemente do estágio de desenvolvimento da soja.

Foto: Fábio Alvares de Oliveira

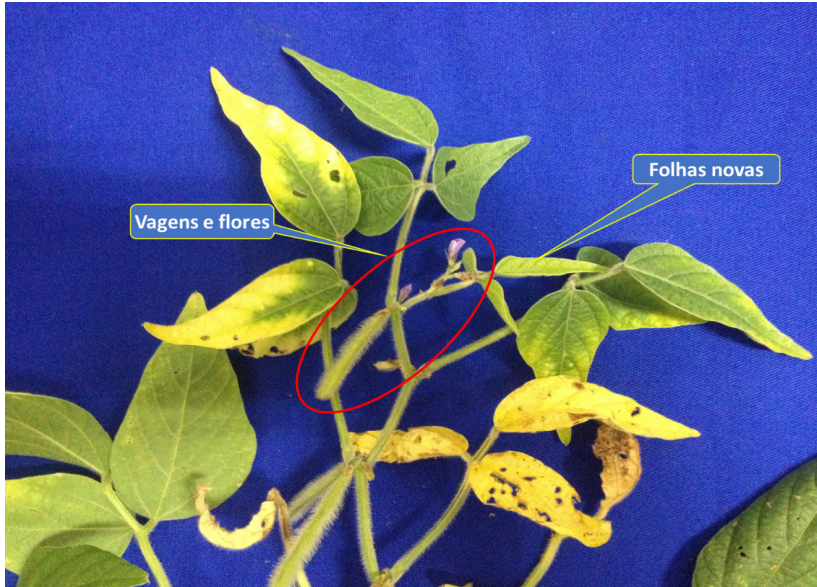


Figura 27. Plantas de soja de tipo de crescimento indeterminado (TCI), com sintomas de deficiência de K no terço superior.

Estes sintomas também têm sido observados em outras regiões com forte tradição agrícola e histórico de manejo nutricional do solo, quase sempre acompanhados de diagnóstico inadequado por parte dos responsáveis pela condução das lavouras, não sendo levada em consideração a deficiência de K, uma das hipóteses para o problema. Independentemente da região, todas as áreas sintomáticas tinham em comum a falta de acompanhamento da fertilidade do solo, ou a interpretação inadequada das análises do solo, e a inexistência da análise de tecido como ferramenta para diagnóstico e possível solução do problema.

Mesmo nas áreas com problemas de manejo, enquanto houver disponibilidade adequada de nutrientes no solo, a absorção pelas plantas e a exportação pelos grãos serão relativamente homogêneas. Conseqüentemente, tomando por exemplo o K, caso se realize o manejo da fertilidade do solo com adubações fixas, porém em doses inferiores às quantidades exportadas, o resultado será balanços negativos em safras sucessivas, com redução gradual da disponibilidade do nutriente no solo (Firmano et al., 2019a). Com este manejo incorreto, os sintomas de deficiência aparecem primeiramente nas áreas de menor disponibilidade e, a ocorrência dos sintomas em “reboleiras” revela manchas de fertilidade na lavoura. Já quando os sintomas aparecem em “faixas” mais ou menos paralelas, evidenciam também falhas na aplicação a lanço (Figura 28). A progressão dos sintomas para áreas maiores nas safras subsequentes, torna a deficiência limitante à obtenção de elevadas produtividades no talhão, caso o problema não seja corrigido.

Foto: Leandro Zancanaro



Figura 28. Lavoura de soja apresentando sintomas de deficiência de K em “faixas alternadas”, devido a falha de regulagem do equipamento de distribuição de fertilizante a lanço.

Muitos agricultores tendem a relacionar a ocorrência de sintomas em reboleiras com fatores bióticos, como nematoides, doenças e pragas de solo, ou abióticos, como compactação ou áreas sujeitas a encharcamento. No entanto, é natural a existência de variabilidade espacial dos teores dos nutrientes no solo. A exploração agrícola associada ao manejo correto da fertilidade do solo, com correção do solo e adubação a taxa variável, tende a tornar as áreas de produção mais homogêneas com o passar dos anos.

Além da variabilidade espacial natural da fertilidade do solo, em alguns casos a desuniformidade de aplicação dos fertilizantes tem intensificado a variabilidade da fertilidade nas lavouras, principalmente quando as estratégias de manejo se baseiam no rendimento operacional em detrimento do critério técnico.

O manejo de sítio-específico com aplicação de fertilizantes a taxa variável pode ser uma excelente ferramenta para reduzir a variabilidade dos nutrientes no solo quando utilizado adequadamente. Contudo, nem sempre esta tecnologia está sendo utilizada sem os princípios técnicos da geoestatística (grade amostral, dependência espacial) e, principalmente, com baixa qualidade ou mesmo falhas na distribuição dos fertilizantes (Figura 28), em geral a lanço na superfície, o que leva ao aumento da variabilidade espacial da fertilidade do solo (Oliveira Junior et al., 2013).

Quando os sintomas de deficiência de K em reboleiras forem visíveis, as áreas próximas sem sintomas provavelmente também estarão sendo afetadas pela baixa disponibilidade do nutriente, o que é conhecido como “**fome oculta**”.

Ainda que não sejam observados sintomas típicos de deficiência de K nas plantas cultivadas em solos com baixa disponibilidade do nutriente, a limitação nutricional pode ser identificada pelos teores foliares abaixo do nível crítico de suficiência, situação em que se caracteriza a “fome oculta”, com redução da taxa de desenvolvimento da planta, da produtividade e da qualidade dos grãos sem que o agricultor tenha clara noção do que está ocorrendo (Borkert et al., 1994). Nesta situação, a utilização de ferramentas de diagnóstico como a análise do solo, deve ser complementada pela análise de folhas, para não haver dúvidas quanto às causas das perdas de produtividade e quanto ao manejo adequado para a correção do problema.

Na Figura 29A, observam-se em detalhes os sintomas clássicos de deficiência de K em plantas jovens (estádio V6), em lavoura sobre solo de origem basáltica. Identifica-se um gradiente de redução da severidade dos sintomas das folhas velhas para as folhas novas, em função da alta mobilidade do nutriente na planta, que promove a sua redistribuição para as partes em crescimento (drenos preferenciais). Nessas condições, os teores de K trocável no solo estavam em $0,05 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e a diagnose nutricional apontou valores muito deficientes de K, da ordem de $6,0 \text{ g/kg}$.

Na Figura 39B, também em área cultivada em solo de textura argilosa, os sintomas ocorreram principalmente nas folhas superiores em plantas de soja TCI, na fase de enchimento de grãos (estádio R5.5). Nesse caso, os teores de Ca e Mg na camada 0 a 10 cm do solo estavam elevados, respectivamente, $6,8$ e $3,6 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, enquanto os níveis de potássio eram considerados muito baixos ($\sim 0,06 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), situação clássica que determina uma forte inibição competitiva deste nutriente. Como resultado do desequilíbrio no solo, os teores de Ca, Mg e K acumulados nas folhas correspondiam a $29,2 \text{ g/kg}$ de Ca, $12,6 \text{ g/kg}$ de Mg e $4,5 \text{ g/kg}$ K.

O que se pode concluir da interpretação desses eventos com teores de K deficientes no solo e nas folhas e sintomas visuais resultantes, é o grande desbalanço no manejo da adubação potássica e desinformação ou negligência quanto ao uso de corretivos do solo, resultando num histórico de exportação de K superior às quantidades previstas no plano de manejo nutricional. Além do teor de K no solo ser muito baixo e apesar da relação Ca/Mg ser de 1,9, a relação $(Ca+Mg)/K$ é de 173 o que denota um grande desequilíbrio do K em relação aos demais cátions. Segundo vários autores, relações $(Ca+Mg)/K$ neste patamar seriam indicativo de desequilíbrio nutricional e redução da produtividade (Alvarenga; Lopes, 1988; Mascarenhas et al., 2000). Entretanto, o principal problema são os baixos níveis de K, não os de Ca e de Mg.

Foto: Cesar de Castro



Figura 29. Sintomas de deficiência de K em plantas de soja: (A) estágio de desenvolvimento vegetativo (V6); (B) estágio de desenvolvimento reprodutivo (R5).

Na Figura 30A observam-se vagens de plantas com deficiência de K, mais destacadamente no terço superior, oriundas de área experimental da Embrapa Soja em Londrina-PR. O aparecimento de vagens com manchas necróticas ou áreas necróticas é uma característica genotípica e, por essa razão, deve-se ter o cuidado no diagnóstico, procurando-se avaliar todas as possíveis causas, a fim de se confirmar ou não a relação com a baixa disponibilidade de K no solo. Por outro lado, na Figura 30B observa-se área de lavoura de soja com deficiência de K nas folhas superiores, cujo plantas não apresentavam vagens com manchas necróticas. Portanto, o diagnóstico de deficiência de potássio deve ser realizado com apoio de resultados de análises químicas e o levantamento das informações de manejo da área, pois não é possível afirmar com segurança que a ocorrência de pontos necróticos nas vagens é sintoma de deficiência de K ou este sintoma é o resultado de uma somatória de fatores em que o suprimento deficiente de K é uma das variáveis.

Foto: Cesar de Castro



Figura 30. Soja com deficiência de K, exibindo manchas necróticas nas vagens do terço superior da planta (A) e plantas de soja com deficiência de K, exibindo sintomas nas folhas, porém, sem manchas necróticas nas vagens (B).

Nos experimentos com manejo de K e manejo de P e K, conduzidos ininterruptamente desde 1989 em Londrina-PR, e desde 2016 em Ponta Grossa-PR, observaram-se plantas com vagens necróticas em áreas com teores de K no solo abaixo de $0,11 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, valores muito inferiores ao nível crítico do nutriente para solos de textura muito argilosa. Nas áreas com menores teores de K, observou-se, inclusive, a redução do ciclo e a murcha acelerada das plantas, principalmente em condições de baixa disponibilidade hídrica. Isto se deve, em parte, à menor eficiência de ajuste osmótico causado pela carência de K nas células-guarda dos estômatos, resultando em maior perda de água pelas plantas. Em geral, plantas deficientes em K também apresentam níveis mais elevados de ácido abscísico que induzem o processo de maturação (Mengel; Kirkby, 1987). Por outro lado, o aumento no suprimento de K está relacionado com a extensão da fase de enchimento de grãos (Haeder; Beringer, 1981).

Na Figura 31 são apresentados, com mais detalhes, os sintomas típicos de deficiência de K e de P em milho cultivado em área experimental de textura muito argilosa ($\sim 740 \text{ g/kg}$ de argila), em Londrina - PR. A planta "A" foi cultivada em solo deficiente em K ($0,05 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), refletindo em teores foliares de $5,9 \text{ g/kg}$ de K (baixo) e $2,5 \text{ g/kg}$ de P (adequado). A planta "B" foi cultivada em solo deficiente em P ($1,9 \text{ mg}/\text{dm}^3$), resultando em teores foliares de $1,3 \text{ g/kg}$ de P (baixo) e $23,2 \text{ g/kg}$ de K (adequado). A planta "C", que apresentou desenvolvimento normal e ausência de sintomas de deficiência nutricional, foi cultivada em solo com teores altos de K ($0,4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$) e de P ($31 \text{ mg}/\text{dm}^3$), correspondendo a níveis adequados de ambos os nutrientes nas folhas, 29 g/kg de K e $2,9 \text{ g/kg}$ de P (Oliveira, 2004).

Foto: Cesar de Castro

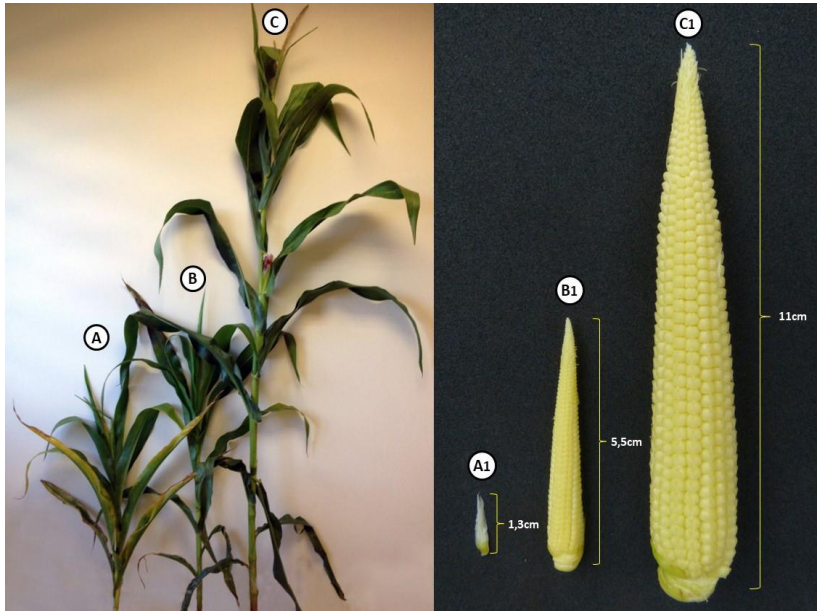


Figura 31. Plantas e espigas de milho com sintomas de deficiência de potássio (A e A1); com sintomas de deficiência de fósforo (B e B1) e sem deficiência aparente (C e C1).

Mesmo não sendo cientificamente correto uma comparação apenas visual para classificar os efeitos negativos da deficiência nutricional sobre o desenvolvimento das plantas, pode-se inferir que as espigas de milho produzidas pelas plantas nos tratamentos com deficiência de K (“A1”) e P (“B1”) apresentaram grande restrição de desenvolvimento quando comparadas à espiga com desenvolvimento normal e sem carência nutricional (“C1”). Além disso, nas condições avaliadas, a deficiência de K limitou de forma mais severa o desenvolvimento das espigas de milho do que a deficiência de P. Pode-se concluir que as condições eram de maior exaustão das reservas de K do solo, inclusive da forma não trocável, ao passo que fração do P pouco lábil ainda contribuiu minimamente para nutrição das plantas de milho no solo em questão.

Na Figura 32, observa-se com mais detalhes os sintomas característicos da deficiência de K em milho, com as folhas mais velhas apresentando clorose, mais severamente nas pontas e margem das folhas, com posterior secamento, necrose e dilaceração de tecido.

Fotos: Fábio A. de Oliveira, Ruan F. Firmano e Álvaro V. de Resende

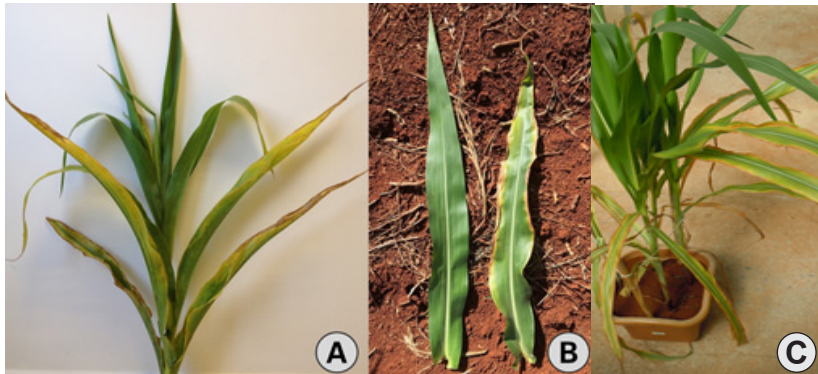


Figura 32. Planta de milho com sintomas de deficiência potássio (A), comparação entre uma folha sadia e outra deficiente em K (B) e aspecto típico de comprometimento das folhas baixas do milho (C).

Os sintomas de deficiência de K podem ser variáveis conforme a espécie vegetal. No caso da braquiária, reconhecida pela grande capacidade de absorção de K, embora na falta deste nutriente a clorose nas bordas das folhas mais velhas nem sempre seja nítida, a turgescência e rigidez dos perfilhos é prejudicada, levando à prostração da planta ou acamamento (Figura 33).

Foto: Álvaro Villela de Resende

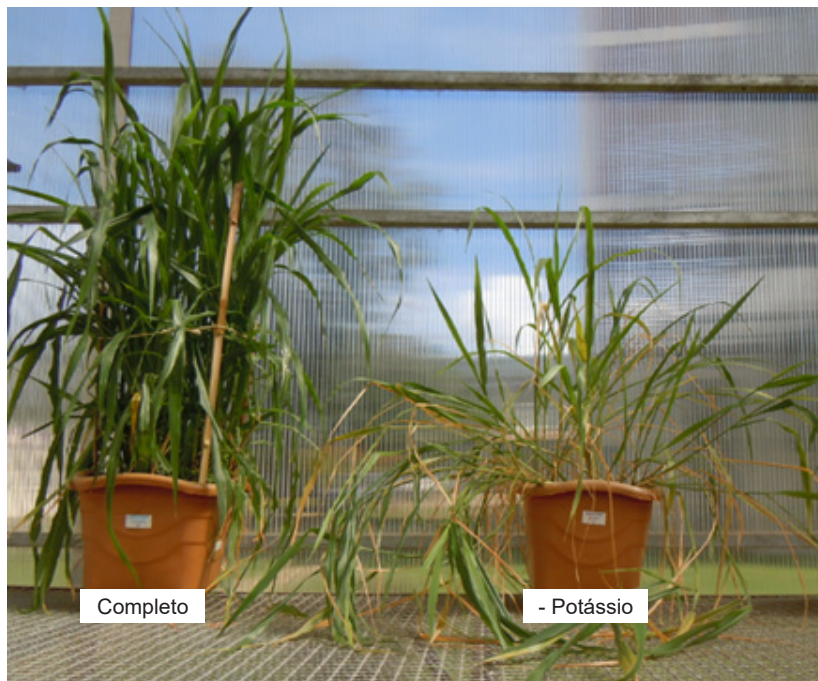


Figura 33. Aspecto visual de plantas de braquiária desenvolvidas sem nenhuma restrição nutricional (esquerda) e com omissão de K na adubação (direita) em solo de Cerrado.

Adubação de sistema

Senhor, deixe-a por mais um ano, e eu cavarei ao redor dela e a adubarei.

Lucas 13, 8 (Parábola da Figueira)

A recomendação de adubação, com o objetivo de atender às necessidades das plantas, fundamenta-se basicamente num tripé, em que uma das bases é o conhecimento do potencial de

extração das culturas que compõem o sistema de produção, a outra é o conhecimento da fertilidade do solo, obtido por meio da análise de solo e, finalmente, o potencial econômico de resposta à aplicação dos fertilizantes (Figura 34).

Elaboração: Ruan Francisco Firmano



Figura 34. Fundamentos da adubação em sistemas de produção tecnificados.

O potencial de extração e as quantidades de nutrientes necessárias para a produção de uma tonelada de grãos de soja encontram-se expressos na Tabela 6 (Oliveira Junior et al., 2020). Estes indicadores foram obtidos de análises de amostras grãos de soja de tipo de crescimento indeterminado, safras 2011/2012 a 2019/2020, realizadas no Laboratório de Análises de Solo e Tecido Vegetal (LASTV) da Embrapa Soja, e possuem grande representatividade, face ao período de coletas e ao número de amostras analisadas.

Tabela 6. Quantidade de nutrientes acumuladas e exportadas pela cultura da soja¹.

Partes da Planta	Nutrientes										
	N	P ⁴	K ⁴	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	kg/ha						g/ha				
Grãos ²	187	16,6	61	10	9	9,5	106	39	223	135	142
Restos Culturais	83	6,8	104	66	28	4,9	177	29	1062	545	116
Total ³	270	23,4	165	76	37	14,4	283	68	1285	680	258
% Exportada	69	71	37	13	24	66	38	58	17	20	55
	kg/t de grãos						g/t de grãos				
Grãos	54	4,8	18	2,8	2,5	2,8	31	11,5	65	39	41
Restos Culturais	24	2,0	30	19,3	8,2	1,4	51	8,3	310	159	34
Total	78	6,8	48	22,1	10,7	4,2	82	19,8	375	198	75

¹ Média de 5 cultivares, com Índice de Colheita Aparente (ICA) médio de 0,39.

² Quantidade de nutrientes contida nos grãos das plantas no estágio final de desenvolvimento - R8 - 13% Umidade.

³ Quantidade de nutrientes contida no tecido vegetal das plantas no estágio de Máximo Acúmulo de Matéria Seca (R6).

⁴ Fatores de conversão: P x 2,29= P₂O₅; K x 1,21= K₂O.

É importante destacar que a extração de nutrientes é determinada por fatores genéticos e edafoclimáticos, sendo estreitamente relacionada à produção de massa seca total e à produtividade de grãos. Contudo, maiores quantidades de nutrientes absorvidas pelas plantas não resultam, necessariamente, em aumentos na produtividade de grãos (Parvej et al., 2016), conforme pode ser constatado na Figura 35, para o caso do K. Por outro lado, as quantidades exportadas de nutrientes são diretamente proporcionais à produtividade, sendo determinada pela concentração dos nutrientes nos grãos, a qual, de

modo geral, é estável (Figura 36), variando muito menos do que a concentração nas folhas.

Além do suprimento em quantidade e relações equilibradas de nutrientes, a maior produtividade pode ser explicada também pela eficiência e adaptabilidade de cada genótipo, expressas pelo índice de colheita aparente (ICA = kg de grãos/kg de matéria seca da parte aérea).

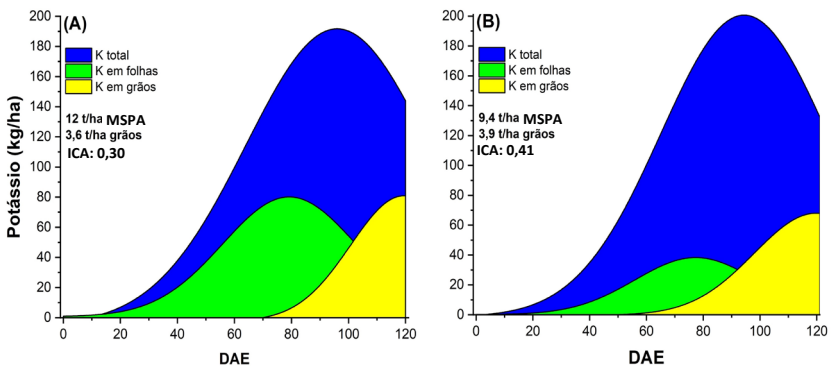


Figura 35. Curva de acúmulo de K ao longo do ciclo (DAE) e índice de colheita aparente (ICA) em duas cultivares de soja (A e B). Londrina-PR, safra 2014/2015.

O maior acúmulo de matéria seca da parte aérea (MSPA) ocorreu na cultivar A, alcançando 12 t/ha, enquanto na cultivar B foi de 9,4 t/ha. Já a produtividade de grãos foi de 3,6 t/ha e 3,9 t/ha, respectivamente. Tais resultados são didáticos, pois, com base na produção de MSPA, que muitas vezes confunde a avaliação visual da produtividade, se poderia presumir que a cultivar A deveria ser mais produtiva (Figura 35).

O ICA da cultivar B foi de 0,41 e o da cultivar A, apenas 0,30, demonstrando que a cultivar B utilizou de modo mais eficiente os fatores da produção para conversão da energia fotossintética em grãos. Interpretando-se de outra forma, foi

necessário que a cultivar A acumulasse 3,3 kg de MSPA para cada kg de grãos produzido, enquanto a cultivar B demonstrou maior eficiência, produzindo 1 kg de grãos para cada 2,4 kg de MSPA acumulada (Figura 35).

Devido à alta correlação entre produtividade da soja e as quantidades de nutrientes exportadas, é essencial considerar a reposição dos nutrientes removidos com a colheita (Tabela 6) no plano de manejo da fertilidade do solo, como um dos critérios para a recomendação de adubação da soja e também de outras culturas que compõem o sistema de produção, de modo a conservar a disponibilidade dos nutrientes do solo em teores adequados ao longo do tempo (Resende et al., 2016, 2019). O balanço entre adição e remoção de nutrientes numa lavoura ou sistema de produção, ou seja, a diferença entre as quantidades aplicadas na adubação e as exportadas com a colheita dos grãos, constitui a base para se manejar a fertilidade do solo de forma precisa e equilibrada, evitando os déficits nutricionais ou a aplicação ineficiente de nutrientes em elevadas doses. A plataforma de Avaliação da Fertilidade do Solo e Recomendação da Adubação (AFERE), da Embrapa Soja, calcula o balanço de nutrientes da soja e outras culturas de grãos, para um único cultivo ou de forma integral e acumulativa para o sistema de produção. Para conhecer esta ferramenta em detalhes, acesse <https://afere.cnpso.embrapa.br>.

Os valores médios indicados na Figura 36 são representativos. Contudo, não seria correto se ter como verdade absoluta um único número/valor como a necessidade nutricional para todas as cultivares e todos os patamares de produtividade, ou mesmo, índices de colheita. Em levantamento feito a partir de resultados de análises de mais de 5.000 amostras de grãos analisadas na Embrapa Soja (LASTV), foi constatada variação de taxas de exportação de 12 a 29 kg de K_2O por tonelada de

grãos. Com base nesta amplitude, compreende-se que tanto fatores genéticos, quanto ambientais e de manejo da cultura, podem afetar a extração de nutrientes, o enchimento dos grãos e a alocação de nutrientes nos mesmos.

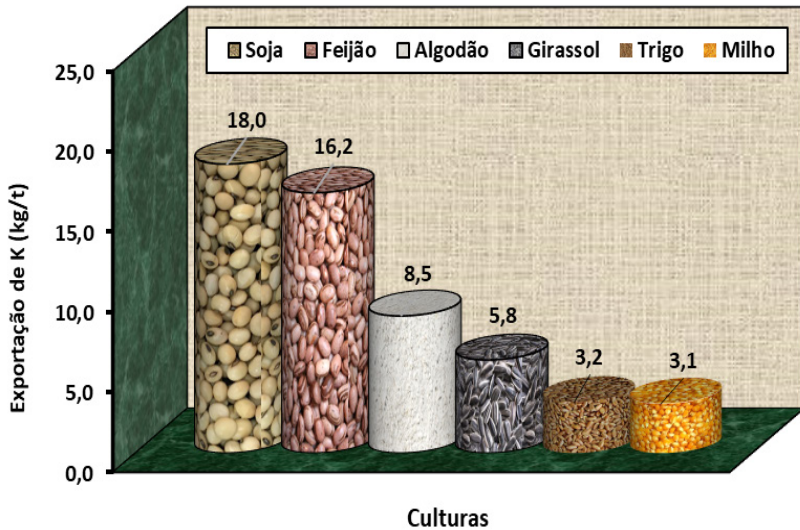


Figura 36. Quantidades médias de K exportados pela produção de 1000 kg de grãos das culturas de soja¹, feijão², algodão², girassol², trigo² e milho³.

Fonte: ¹Oliveira Junior et al. (2020); ²Embrapa Soja (dados não publicados); ³Duarte et al. (2019).

A adubação potássica apenas com a reposição do K exportado pelos grãos da soja (adubação de restituição) é uma estratégia de manejo recomendável para lavouras em Latossolos e Nitossolos de origem basáltica do Paraná, com teores de K trocável, originalmente, acima do nível crítico. No entanto, a mesma lógica pode ser adotada para outras regiões em condições de solos que alcançaram teores altos do nutriente em função do manejo de construção da fertilidade e que, portanto,

apresentam reduzido potencial de resposta à adubação. Assim, no dimensionamento da adubação potássica de restituição, deve-se considerar a aplicação de 22 kg de K_2O para cada tonelada de grãos e de acordo com a expectativa de produção. Em solos argilosos com boa reserva de K acima do nível crítico, que por si só atenderia à demanda de um cultivo de soja, a adubação de restituição pode ser realizada em momento posterior à colheita, calculada conforme a produtividade efetivamente registrada a cada safra. Raciocínios análogos podem ser aplicados no manejo nutricional das demais culturas que compõem o sistema de produção em cada talhão. Contudo, a adoção desta estratégia exige o monitoramento periódico da fertilidade pela análise do solo, complementada pela análise de tecido, as principais ferramentas de aferição do manejo da adubação de sistema.

Quando comparada a outras culturas como o milho, trigo, feijão, e até mesmo o girassol, cultura reconhecida como grande consumidora de K e eficiente quanto ao seu aproveitamento ao longo do perfil do solo (Castro; Oliveira, 2005), a taxa de exportação pela soja é superior à das demais (Figura 36) e a remoção com a colheita alcança quase 38% do total absorvido durante o ciclo.

Na literatura internacional, observa-se padrões semelhantes para as concentrações de K nos grãos de soja, amendoim, trigo, sorgo e algodão (Figura 37) cultivados em solos tropicais de carga variável da Austrália (White et al., 2021). Os dados também ilustram o padrão de acúmulo de K nos grãos em cada cultura, independentemente do rendimento de grãos. Essa constatação reforça as observações obtidas em laboratório, de que a concentração de nutrientes nos grãos é pouco variável (tamponada) e sem relação clara com o nível de produtividade ou os teores de nutrientes nas folhas.

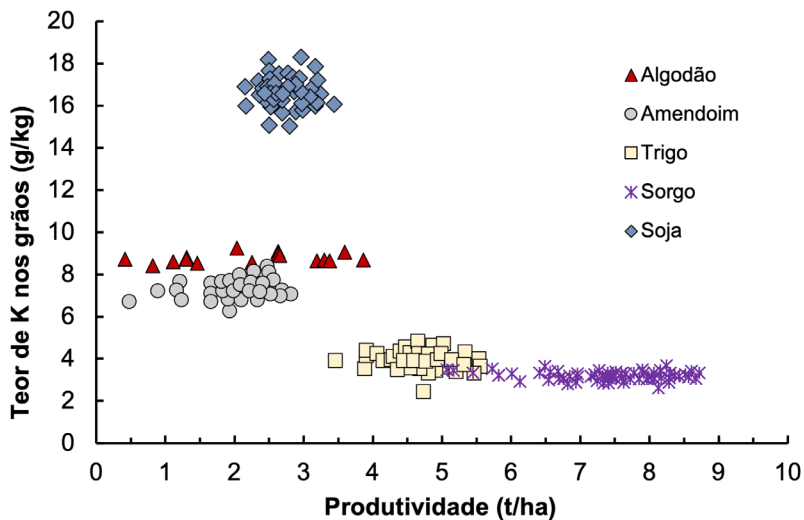


Figura 37. Relação entre o rendimento/produktividade e a concentração de K em grãos de soja, amendoim, trigo, sorgo e algodão cultivados em Oxisol em Kingaroy (Queensland, Austrália).

Fonte: adaptado de White et al. (2021).

Castro et al. (2011) relataram casos de deficiências nutricionais decorrentes do manejo inadequado da adubação na cultura da soja, principalmente em relação ao K. Esses autores observaram significativo aumento da ocorrência de plantas com sintomas de clorose e até necrose nas folhas superiores de diversas cultivares de soja, assim como no girassol e no milho, em lavouras comerciais, sobretudo em reboleiras (Figuras 38, 39 e 40), ou em área total de soja (Figura 42).

Um bom exemplo pode ser observado na Figura 38, registrada em área comercial na safra 2018/2019, no Paraná, com sintomas de deficiência de K em reboleiras (expressando a variabilidade horizontal da disponibilidade do nutriente), e danos mais acentuados nas folhas do terço superior da planta. Nesta lavoura, as plantas com os sintomas apresentavam 2,23 g/kg

de K nas folhas do terço superior e teor de K no solo era de $0,13 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, abaixo do nível crítico para solos de textura muito argilosa (Oliveira Junior et al., 2020). Nas áreas próximas às reboleiras, observava-se um gradiente de redução da intensidade dos sintomas visuais até plantas sem sintomas aparentes, onde, a concentração foliar era de $9,67 \text{ g/kg}$ de K, com teor de potássio no solo de $0,21 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$.

Foto: Cesar de Castro



Figura 38. Área com sintoma de deficiência de K, com ocorrência em reboleiras e nas folhas do terço superior.

Com base no exemplo da Figura 38, mesmo que o resultado do teor médio de K na análise de solo da lavoura fosse interpretado como adequado, conclui-se que ele não seria representativo da área devido às reboleiras deficientes. Portanto, em casos como esse, faz-se necessário o aprimoramento da forma de coleta de amostras de solos, por metodologias mais apropriadas, e a realização de adubação a taxa variável, para correção dos desvios localizados que acabam por reduzir a produtividade do talhão como um todo.

O tomador de decisão deve ter em mente que, quando se aduba em quantidade aquém da necessária para repor ao menos a quantidade de K efetivamente exportada pelos grãos, a diferença em relação à demanda da cultura será atendida por meio da absorção do nutriente das reservas pré-existentes no solo. Assim, se este modelo de manejo da adubação for mantido, com doses subestimadas, em poucas safras a área poderá apresentar reboleiras com sintomas de deficiência de K, devido ao recorrente processo de “mineração” das reservas. Estas reboleiras irão gradativamente se expandir na lavoura, podendo as causas serem confundidas com problemas envolvendo agentes bióticos, como a incidência de nematoides fitopatogênicos, por exemplo.

Em uma revisão sobre a notável depleção de K que vem ocorrendo nos solos da Índia, Das et al. (2022) apontam que grande parte dos sistemas de produção no país asiático estão em balanço negativo de K, especialmente em relação ao uso de fósforo e de nitrogênio. Os mesmos autores citam: i) a necessidade premente de refinamento das recomendações de fertilizantes potássicos, ii) o aumento das variáveis utilizadas em cálculos de balanço, iii) a consideração de formas não-trocáveis (extraídas com NaBPh_4) em levantamentos de fertilidade, bem como, o acompanhamento de alterações em taxas de liberação e fixação de K e, por fim, iv) avaliações agrônômica e econômica de fontes alternativas de K em sistemas de produção indianos.

É interessante observar que nas áreas com problemas de deficiência de K na soja, conforme seria esperado, também pode ocorrer redução do potencial produtivo das culturas que compõem o sistema de produção na mesma área. É o que se visualiza na Figura 39, no caso do girassol, uma espécie que absorve grande quantidade de K do solo, exigindo uma avaliação mais detalhada da fertilidade e a correção da sua variabilidade horizontal, de modo a minimizar a desuniformidade no talhão.

Foto: Cesar de Castro



Figura 39. Área com reboleira expressando sintoma de deficiência de K em girassol, sobretudo nas folhas inferiores das plantas. Londrina-PR.

Um bom exemplo ilustrado na Figura 40 reforça a importância da adubação de sistema e os efeitos desencadeados nas culturas que se sucedem na área. Observa-se que mesmo uma lavoura de milho, cultura com menor demanda de K para seu metabolismo, expressa os sintomas clássicos de deficiência do nutriente nas folhas, associado a drástica redução do porte das plantas e da sanidade das plantas. Nesta área, os sintomas se manifestaram no mesmo padrão verificado em soja ou girassol,

em reboleiras, conduzindo o agricultor ou os técnicos a suspeitarem de doenças radiculares ou nematóides. Vale destacar, que numa análise de nematóides, será possivelmente encontrado diferentes espécies na amostra de solo/raízes coletada, sem, contudo, ser a causa principal dos sintomas. Tais patógenos também se aproveitam da perda de vigor das plantas na lavoura, provocada por eventuais desequilíbrios nutricionais.

Foto: Fábio Álvares de Oliveira



Figura 40. Lavoura de milho expressando padrão de aparecimento de deficiência de K em reboleira.

Ainda na Figura 40 e na Figura 41 é possível observar a coloração característica das folhas deficientes em K, a grande diferença no desenvolvimento das plantas e da espiga. Como máxima da observação dos sintomas de deficiência de K em milho poderia ser dito: “quando os sintomas aparecem no milho, os cultivos de soja já vêm sofrendo há tempos e o agricultor, a pari passu, perdendo dinheiro”.

Foto: Fábio Álvares de Oliveira



Figura 41. Planta de milho pouco desenvolvida com grave deficiência de K.

Com a continuidade do manejo deficiente em K, o problema se agrava e os sintomas se expandem para áreas maiores, conforme pode ser observado na lavoura da Figura 42, em área com aproximadamente 1.400 hectares de soja. Esta área vinha apresentando sintomas de amarelecimento nas folhas superiores em zonas isoladas da lavoura, as quais foram coalescendo ao longo das safras. A deficiência de K não foi uma hipótese

aventada para o problema e a intervenção adotada como possível solução foi a realização de calagem. Como o problema era causado pela deficiência de K, a calagem intensificou o desequilíbrio entre Ca+Mg e o K, agravando ainda mais o problema. Com a evolução dos sintomas durante a safra, as folhas superiores apresentaram áreas necrosadas e quebradiças, com folíolos de aparência esfarrapada (Figura 42B).

Foto: César de Castro



Figura 42. Lavoura com sintoma de deficiência de K em área total (A), ocorrendo nas folhas do terço superior e com aspecto de folha esfarrapada (B). (Boa Ventura de São Roque-PR).

Assim, para o manejo adequado da adubação potássica em soja, uma estratégia importante é considerar o balanço de K nas culturas que compõem o sistema de produção. O principal objetivo consiste na aplicação de doses adequadas e mais

precisas de fertilizantes, atendendo às necessidades das culturas e buscando um balanço do nutriente no sistema próximo da neutralidade (entradas via adubação \approx saídas via colheita dos grãos), de modo a se evitar o esgotamento gradual das reservas de K no solo, assim como aplicações em doses muito acima das efetivamente requeridas pelas culturas.

Avaliando 60 safras, em 32 anos de experimentação, Firmano et al. (2020) estimaram que a dose de 71,5 kg/ha/ano de K seria o mínimo suficiente para satisfazer a necessidade da soja e promover o balanço neutro de K em sistemas de produção com a leguminosa no verão, sucedida por espécies como trigo e milho em segunda safra. Contudo, esses autores trabalharam com dados de um Latossolo Vermelho muito argiloso (~ 720 g/kg de argila), Londrina-PR, cultivado em SPD há mais de duas décadas, o que caracteriza uma condição específica, não aplicável para muitas regiões do Brasil. Foi ressaltado também que o tipo de espécie, cultivar, relevo, textura, mineralogia, além de outros fatores, podem influenciar de forma expressiva as estimativas de dose de suficiência na adubação.

Outra questão que deve ser levada em consideração no caso do K é que, em solos manejados corretamente, principalmente com a adoção do SPD e da rotação de culturas, a eficiência de aproveitamento do fertilizante potássico é superior a 90% (Oliveira Junior et al., 2010). Para alcançar esse nível de sucesso, o monitoramento da fertilidade do solo e o balanço do nutriente são fundamentais, conciliando a sustentabilidade dos sistemas de produção com o atendimento das necessidades nutricionais para altas produtividades.

Apesar dos problemas climáticos que ocasionalmente ocorrem em algumas regiões, a produtividade média da cultura da soja vem aumentando no Brasil, não só em função do potencial produtivo das novas cultivares, mas também pelas técnicas de manejo da cultura e da adubação, entre outras. Contudo, o aumento da produtividade também tem elevado a extração e exportação de nutrientes do solo. Nesse contexto, tem sido frequente a ocorrência de áreas em processo de redução das reservas nutricionais no solo, não só pelas maiores produtividades de grãos, como também pela maior demanda nutricional da soja para a produção de uma mesma quantidade de tecido vegetal, principalmente nas cultivares mais produtivas.

Deste modo, caso a adubação seja inferior à exportação pelos grãos, o balanço nutricional será negativo (exportação > adubação) e promoverá, gradativamente, o esgotamento das reservas dos nutrientes do solo, comprometendo o potencial produtivo das culturas que compõem o sistema de produção, muitas vezes, sem a percepção do agricultor (Resende et al., 2019; Das et al., 2022).

É interessante observar que anualmente são lançados no mercado genótipos com maior potencial produtivo. A maioria destas cultivares são de tipo de crescimento indeterminado, característica que tem se traduzido em uma série de vantagens agronômicas e de manejo, como por exemplo: i) antecipação da época de semeadura e precocidade, permitindo o plantio da segunda safra (safrinha) com altos rendimentos; e ii) ampla faixa de adaptação e amplitude da época de semeadura numa mesma região (que são mais restritivas nos genótipos de tipo de crescimento determinado). Outras características importantes são os maiores índices de colheita, melhor arquitetura e

porte ereto, permitindo maior população de plantas e facilitando o manejo de insetos/pragas e de doenças. Contudo, esta mudança da demanda do mercado para genótipos de tipo de crescimento indeterminado também exige ajustes ou mesmo cria novos paradigmas de manejo da fertilidade.

Não obstante as potencialidades das novas cultivares, o ganho real de produtividade avança numa taxa muito menor que o potencial genético. Mesmo que se considerem as adversidades climáticas e novas pragas/doenças como fatores limitantes à produção, o fato é que o manejo da adubação tem sido cada vez mais simplificado nas fazendas, na vã ilusão de que “aplicar” fertilizante no solo é sinônimo de adubação equilibrada.

A adubação com K é uma das operações com maior flexibilidade de aplicação, tendo em vista a alta solubilidade dos fertilizantes normalmente utilizados e a boa mobilidade do nutriente no solo, com o contato íon-raiz por fluxo de massa e difusão favorecendo a absorção pelas plantas. Assim, é comum e pertinente que a aplicação de K possa ser feita também a lanço, aumentando a operacionalidade da atividade agrícola e a eficiência da semeadura.

No entanto, também por questões operacionais, cada vez mais agricultores estão eliminando os terraços, mesmo em áreas com elevado declive e comprimento de rampa, com cobertura vegetal escassa e plantio direto inadequadamente conduzido, considerando somente a eliminação do preparo de solo e não a adoção completa da tecnologia do “Sistema Plantio Direto”. Esta tem como premissas deixar de revolver o solo, adotar a rotação de culturas e manter permanente cobertura da superfície com palhada.

É importante entender que a prática de aplicação de fertilizantes a lanço acaba favorecendo a movimentação dos nutrientes horizontalmente na superfície, em razão de processos erosivos por escoamento de água, inclusive pela baixa taxa de infiltração ocasionada por compactação do solo. Em algumas situações, os nutrientes assim carregados podem alcançar diretamente os mananciais e, juntamente com a matéria orgânica, causar a eutrofização das águas de rios e lagos.

Um exemplo desta situação pode ser visto na Tabela 7, com resultados de análises de solo de área de lavoura com processo erosivo. Foram coletadas amostras em duas profundidades, na lavoura de soja normal, na área erodida e no sedimento erodido e depositado na cota mais baixa do terreno. Além da perda de solo e modificação do relevo, dificultando o tráfego de maquinário, observa-se que ocorre grande carregamento de nutrientes e de matéria orgânica. De acordo com os dados da Tabela 7, encontram-se em cada unidade de volume de sedimento (dm^3), o equivalente a 956, 146, 287, 37 e 28 mg de Ca, Mg, K, P e matéria orgânica, respectivamente, perdidos da área de lavoura (Figura 43). Este processo erosivo, que nem sempre é tão visível como na figura, além das questões ambientais, empobrece o solo, reduz a produtividade e a homogeneidade da fertilidade do talhão, além de assorear rios e lagos.

Tabela 7. Resultados da análise de amostras de solo coletadas em duas profundidades, na lavoura de soja normal, na área erodida e no sedimento carregado. Safra 2017/2018, Londrina-PR.

Área de Coleta	Prof. (cm)	pH ¹	Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	CTC	V	P	C
			cmol _c /dm ³							%	mg/dm ³	
Lavoura	0-10	4,5	0,10	4,6	4,8	1,1	0,67	6,6	11,2	59	26	20
Lavoura	10-20	4,4	0,23	4,7	3,6	0,9	0,52	5,0	9,7	52	26	18
Erosão	0-10	5,1	0,26	3,4	3,7	0,8	0,62	5,1	8,5	60	31	13
Erosão	10-20	5,1	0,39	3,1	2,8	0,7	0,50	3,9	7,0	56	3	9
Sedimento	0-10	4,9	0,10	3,9	4,7	1,2	0,73	6,6	10,5	63	25	14
Sedimento	10-20	4,4	0,10	5,0	4,9	1,2	0,74	6,8	11,8	58	48	18

¹pH determinado em solução extratora de CaCl₂ 0,01M, na relação 1:2,5.

Foto: Adilson de Oliveira Júnior



Figura 43. Talhão de lavoura de soja com processo erosivo por escoamento de água (enxurrada), Alvorada do Sul-PR.

No SPD, a boa mobilidade vertical e radial que o K apresenta no perfil do solo, é fundamental para permitir adequada concentração do nutriente junto às raízes das culturas. Neste sistema, os corretivos e ao menos parte dos fertilizantes não são aplicados e incorporados ou alocados no sulco de semeadura. Práticas como a remoção de terraços, principalmente em terrenos declivosos e sob grande volume de chuvas, agrava as perdas por escoamento superficial, resultando em diminuição da fertilidade dos talhões. Como axioma, poder-se-ia ter como estratégia de manejo que, antes de aumentar a fertilidade do solo, é preciso aprender a parar de perdê-la.

Adubação potássica na soja

Não se deve criticar sem isenção àqueles agricultores que desde o descobrimento do Brasil não dispuseram ou dispõem de ferramentas e insumos mais adequados para aumentar ou manter a fertilidade do solo, reduzir a acidez do solo e desenvolver uma agricultura mais sustentável.

O KCl é a principal fonte de K para a agricultura, em função da maior oferta de produção mundial e da maior viabilidade técnica e econômica deste fertilizante, determinada pela elevada concentração solúvel do nutriente (58-60% de K_2O), que garante uma melhor logística de comercialização.

Outras fontes multinutrientes têm sido disponibilizadas aos agricultores, com grande variação na concentração total e na presença de formas solúveis e pouco solúveis de K. Assim, a tomada de decisão para a aquisição e utilização destes insumos não deve considerar apenas o custo da fonte fertilizante. A recomendação de adubação deve ter como base a porcentagem da concentração total de K que é solúvel em água ou

ácidos fracos, como o ácido cítrico, representando a fração disponível a curto prazo. Assim, a decisão deve considerar, além do custo unitário da fração de K solúvel (ponto de K ou K_2O na formulação), o custo da logística de transporte, da aplicação e o rendimento operacional da adubação com cada fonte.

Para a incorporação aos sistemas de produção agrícolas mais tecnificados, solos em áreas de abertura, renovação de pastagem ou com teores de K classificados regionalmente como muito baixos ou baixos, recomenda-se realizar uma adubação corretiva para elevar a disponibilidade do nutriente no solo e a adubação de manutenção para garantir o fornecimento do nutriente em quantidades adequadas às plantas.

No bioma Cerrados, em que predominam solos de origem sedimentar, como Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, pobres em K, pode-se adotar a adubação corretiva total, que consiste em aplicar doses elevadas de K para ajustar a disponibilidade no solo a teores considerados críticos para o estabelecimento de determinada cultura em determinado ambiente de produção. Em seguida, adotam-se aplicações anuais para repor a exportação de K pelas culturas. Alternativamente, a adubação corretiva pode ser realizada de forma gradual, que consiste em aplicar anualmente quantidades de K um pouco acima da necessidade das culturas, promovendo a elevação da disponibilidade do nutriente num prazo de algumas safras, até atingir teores adequados de K trocável no solo.

Nos Cerrados, a recomendação de adubação leva em consideração a capacidade de retenção de K em dois grupos de solos: solos com $CTC_{pH\ 7,0}$ menor do que $4,0\ \text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e solos com $CTC_{pH\ 7,0}$ maior ou igual a $4\ \text{cmol}_c/\text{dm}^3$ (Tabela 8). Nos solos de baixa CTC, há maior propensão à movimentação de K no perfil, devido ao reduzido número de cargas negativas em relação a solos de maior CTC, aumentando o potencial

de perdas de K por lixiviação. Por esta razão, doses acima de 100 kg/ha de K_2O , independentemente da CTC do solo, devem ser, preferencialmente, parceladas ou aplicadas a lanço (Vilela et al., 2004). Quantidades superiores a 60 kg/ha de K_2O devem ser evitadas na adubação em sulco de semeadura, a fim de reduzir possíveis danos por salinidade às sementes e plântulas.

Tabela 8. Interpretação da análise do solo e recomendação de adubação corretiva de K para culturas anuais conforme a disponibilidade do nutriente em solos dos Cerrados.

Teor de K ¹		Interpretação	Corretiva Total ²	Corretiva gradual
mg/kg	cmol _c /dm ³		kg de K ₂ O/ha	
CTC a pH 7,0 < 4,0 cmol_c/dm³				
< 16	< 0,04	Baixo	50	70
16 a 30	0,04 a 0,08	Médio	25	60
31 a 40	0,08 a 0,10	Adequado ³	0	0
> 40	> 0,10	Alto ⁴	0	0
CTC a pH 7,0 ≥ 4,0 cmol_c/dm³				
≤ 25	< 0,06	Baixo	100	80
26 a 50	0,06 a 0,13	Médio	50	60
51 a 80	0,13 a 0,20	Adequado ³	0	0
> 80	> 0,20	Alto ⁴	0	0

¹ K trocável extraído por Mehlich 1.

² A adubação corretiva total deve ser complementada com a adubação de manutenção no sulco de semeadura.

³ Para solos com teores de potássio dentro dessa classe, recomenda-se adubação de manutenção de acordo com a expectativa de produção.

⁴ Para solos com teores de potássio dentro dessa classe, recomenda-se 50% da adubação de manutenção ou da extração de potássio esperada ou estimada com base na última safra.

Se o teor de K for interpretado como adequado, para evitar o decréscimo de K no solo, deve-se aplicar anualmente doses consideradas de manutenção, para repor as quantidades de K exportadas pela cultura. Para solos com altos teores de K, até atingir teores adequados, eventualmente podem ser adotadas adubações de manutenção equivalentes a 50% da exportação de K.

Para a adubação de manutenção, e considerando a exportação de K para a soja na região dos Cerrados, recomenda-se aplicar 22 kg de K_2O para cada tonelada de grãos, pressupondo que não haja perdas por lixiviação e/ou escoamento superficial significativas, e que os restos culturais sejam mantidos na área.

Especificamente para o estado de Mato Grosso (Tabela 9), os trabalhos de pesquisa conduzidos na Fundação MT resultaram em recomendações regionalizadas e adaptadas às características de solo e ao sistema de produção predominante (Zancanaro et al., 2022).

Tabela 9. Interpretação dos teores de K no solo e recomendação de adubação (kg/ha de K_2O) da soja para uma produtividade esperada de 3600 kg/ha (60 sc/ha).

Níveis	Teor de K^+ no solo ¹		Dose de K
	mg/dm ³	cmol _c /dm ³	kg/ha de K_2O
Bom	> 60	> 0,15	72 a 80 ²
Médio	40 a 60	0,10 a 0,15	80 a 100
Baixo	20 a 40	0,05 a 0,10	100 a 120
Muito Baixo	< 20	< 0,05	120 a 140

¹ K trocável extraído por Mehlich 1.

² As quantidades recomendadas equivalem à reposição da extração esperada (20 kg/ha a 23 kg/ha de K_2O para cada 1.000 kg de grãos) e podem ser reduzidas por uma safra. Fonte: Zancanaro et al. (2022).

Após oito anos de avaliação em solos arenosos, os resultados de Zancanaro et al., (2022) confirmaram a ausência de resposta à adubação potássica em quantidades superiores a 100 kg/ha e 120 kg/ha de K_2O por safra, tanto na produtividade da soja, quanto na elevação dos teores de K no solo. Esse ambiente de produção exige acompanhamento da fertilidade do solo e maior precisão da adubação potássica, para garantir a eficiência técnica e econômica, evitando-se quantidades baixas (menores que a exportação) e também, muito elevadas (suscetíveis à lixiviação). Nesse caso, mais do que investir em quantidade, é importante investir em formas mais eficientes de aplicação, como o parcelamento e a distribuição a lanço em área total, e acima de tudo, incluir no sistema espécies com elevada capacidade de acumular e reciclar o nutriente a partir das raízes, como o milheto ou a braquiária.

Para o Paraná, a adubação potássica da soja também varia em função das classes de disponibilidade de K nos solos (Tabela 10). A recomendação local é de que a adubação com K seja feita preferencialmente no sulco de semeadura até a dose de 60 kg/ha de K_2O . No entanto, em solos de maior CTC e disponibilidade adequada do nutriente, a distribuição do fertilizante pode ser feita a lanço, até 30 dias antes da semeadura.

Tabela 10. Indicação de adubação com potássio (kg/ha de K₂O) para a soja no estado do Paraná

CTC	CLASSES	Teor de K (Mehlich 1)		Dose
		cmol _c /dm ³	mg/dm ³	kg/ha (K ₂ O)
< 4	Muito Baixo	< 0,04	< 16	140
	Baixo	0,04 - 0,08	16 - 33	120
	Médio ¹	0,09 - 0,12	34 - 48	90
	Alto ²	0,13 - 0,24	49 - 95	M
	Muito Alto ³	> 0,24	> 96	R
4 a 8	Muito Baixo	< 0,06	< 23	180
	Baixo	0,06 - 0,11	23 - 44	160
	Médio ¹	0,12 - 0,22	45 - 87	130
	Alto ²	0,23 - 0,44	88 - 173	M
	Muito Alto ³	> 0,44	> 174	R
8 a 12	Muito Baixo	< 0,09	< 35	220
	Baixo	0,09 - 0,18	35 - 72	180
	Médio ¹	0,19 - 0,32	73 - 127	150
	Alto ²	0,33 - 0,64	128 - 252	M
	Muito Alto ³	> 0,64	> 252	R
12 a 16	Muito Baixo	< 0,13	< 51	240
	Baixo	0,13 - 0,26	51 - 103	200
	Médio ¹	0,27 - 0,41	104 - 162	160
	Alto ²	0,42 - 0,82	163 - 322	M
	Muito Alto ³	> 0,82	> 322	R

¹ O limite superior dessa classe indica o nível crítico.

² A dose de manutenção (M), baseada no balanço da adubação, equivale a 90% de eficiência de reposição (R) da quantidade de nutriente exportada (22 kg K₂O/t de grãos).

³ A dose de reposição (R), baseada no balanço da adubação, equivale a 100% de eficiência de reposição (R) da quantidade de nutriente exportada (22 kg K₂O/t de grãos). Nessa classe, a dose pode ser reduzida em qualquer proporção, ou até mesmo suprimida, devendo-se realizar o monitoramento pela análise de solo periódica.

Para a classe de teor Alto, indica-se a aplicação da dose de manutenção, considerando 90% de eficiência, calculada com base na reposição de K para a produtividade esperada. Para a classe de teor Muito Alto, indica-se a aplicação da dose para reposição, considerando 100% de eficiência. Nesta classe, em solos de CTC > 5 cmol_c/dm³ e em função da conjuntura econômica, a adubação pode ser reduzida em qualquer proporção, até a supressão completa, sem redução de produtividade. No entanto, é imprescindível, monitorar a fertilidade solo para quantificar a redução da disponibilidade de potássio.

Na adubação localizada no sulco de semeadura, a quantidade de fertilizante deve ser limitada a doses inferiores a 60 kg/ha de K₂O, ou respeitando-se os limites máximos indicados para cada região, para evitar os danos ao vigor e germinação das sementes provocados pelo efeito salino do KCl, principalmente em solos de textura mais arenosa. Nesse caso, a adubação complementar de potássio poderá ser realizada a lanço em cobertura, até o estágio vegetativo V4/V5 (Figura 44). Sendo que, a antecipação da adubação parcial ou total de K a lanço, antes da semeadura, também são alternativas com boa eficiência.

Foto: César de Castro



Figura 44. Plantas de soja nos estádios vegetativos V4 (A) e V5 (B).

A decisão estratégica da forma de adubação requer a avaliação da distribuição de nutrientes no perfil, para que a produtividade não venha a ser limitada, mesmo com a aplicação de doses adequadas, principalmente em condições de menor disponibilidade hídrica.

Os dados da Figura 45 remetem ao conceito da estreita relação entre o aumento da disponibilidade de nutrientes no perfil de solo, principalmente em solos com baixos teores de nutrientes, e o aumento da resposta das culturas às doses de fertilizantes. As informações advieram de experimento instalado em área de lavoura que apresentava graves sintomas de deficiência de K, em solo com $0,13 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e $\sim 750 \text{ g/kg}$ de argila. Em função dos sintomas observados e na busca da melhor estratégia de correção do problema, três abordagens foram utilizadas. Doses de K no sulco, doses de K a lanço e a combinação de parte das doses de K no sulco de semeadura (abaixo e ao lado das sementes) e o restante da dose, distribuído a lanço em cobertura. Os resultados evidenciaram que as

maiores produtividades foram obtidas quando parte da necessidade de K foi aplicada no sulco de semeadura e o restante da dose aplicada a lanço em cobertura, até o estágio V4/V5.

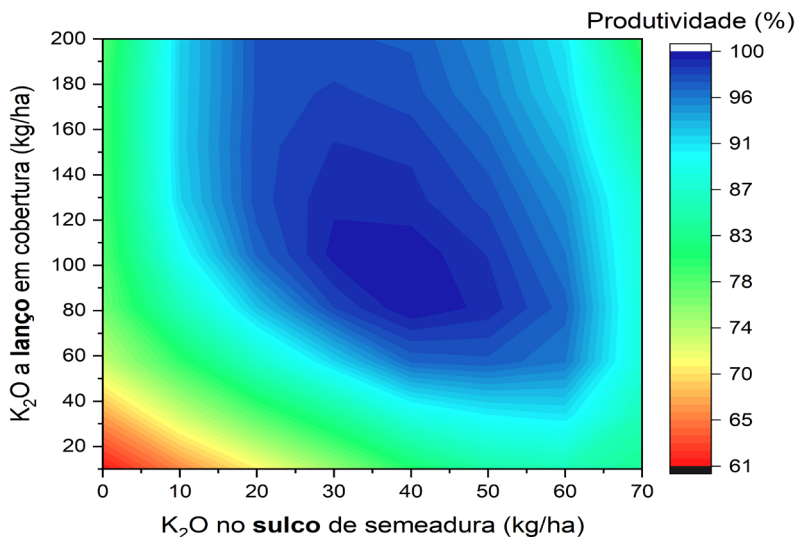


Figura 45. Produtividade da soja em função da aplicação de potássio no sulco de semeadura, em cobertura ou a combinação de sulco de semeadura e cobertura. Primeiro de Maio-PR, safra 2016/2017.

Assim, uma inferência importante do manejo da adubação potássica em solos com teores baixos de K é que a melhor resposta da soja depende da aplicação de quantidades adequadas de fertilizantes, nas épocas e na forma corretas. Por exemplo, em solos com teores baixos de K no perfil explorado pelas raízes, mesmo uma fonte solúvel como o KCl, quando aplicado a lanço em superfície na semeadura ou em cobertura, não se movimenta em velocidade suficiente para garantir a absorção pelas raízes e o suprimento adequado desde os estágios iniciais de desenvolvimento da soja.

Na região dos Cerrados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA), o manejo da adubação potássica pode ser adotado de forma similar ao preconizado em outras regiões. Para confirmar esta similaridade, na Figura 46 são apresentados resultados do somatório da produtividade de 5 anos de cultivo (2001 a 2005), em função das quantidades de K aplicadas a lanço, antes da semeadura a cada safra, no sul do Piauí, em Latossolo Amarelo com 280 g/kg de argila. Observa-se que para alcançar 14.000 kg de grãos de soja, foram necessários ~350 kg/ha de K_2O nas 5 safras, valor próximo à necessidade de 22 kg de K_2O /t de grãos (Tabela 6), para que seja reposta a exportação nas colheitas.

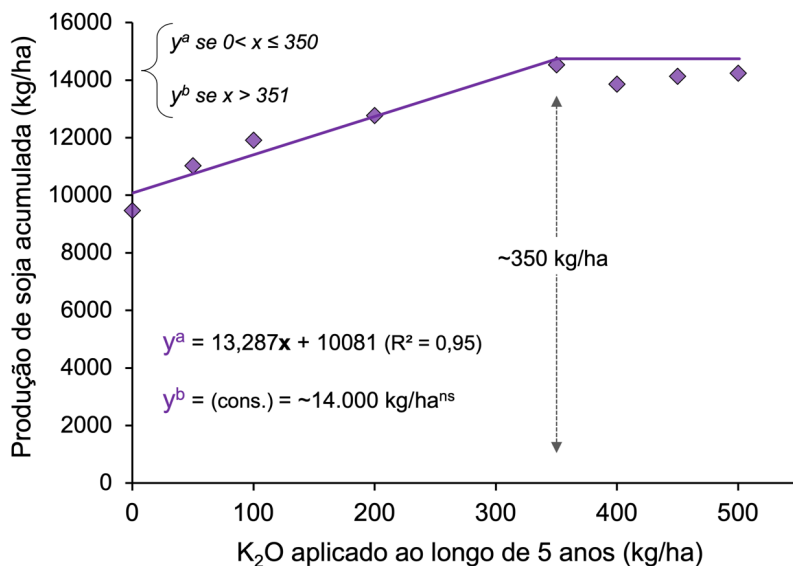


Figura 46. Rendimento de soja em função da aplicação de K ao longo de 5 anos, em Latossolo Amarelo com 280 g/kg de argila. Bom Jesus-PI, safras 2001 a 2005.

Nutrição equilibrada: foco no balanço de nutrientes

Para Galeno, o médico deveria dominar a filosofia - lógica (a disciplina do pensamento), física (a ciência da natureza) e a ética (a ciência da ação - conduta). Filosofia e medicina eram complementares: o melhor médico era também um filósofo, enquanto o curandeiro não filosófico (o empírico) era como um arquiteto sem um plano. A confiança do paciente era fundamental no processo de cura que poderia ser conquistada de maneira pelo domínio do prognóstico, uma arte que exige experiência, observação e lógica.

Porter (1999)

Na avaliação da fertilidade do solo, algumas vezes, apenas os teores disponíveis dos nutrientes são levados em consideração. No entanto, outros aspectos relacionados à presença de formas não trocáveis de K, à capacidade tampão e às relações entre cátions e ânions do solo tornam a avaliação mais completa e assertiva. A condição de elevada disponibilidade de nutrientes no solo é indicadora de alta fertilidade, porém, este ambiente de produção necessita estar equilibrado, para que a interação entre os nutrientes não resulte em limitações à absorção de outros, como ocorre entre Ca, Mg e K por exemplo.

Segundo Mascarenhas et al. (1987, 1988, 2000, 2004) a soja mostra melhores respostas de produtividade quando a relação $(Ca+Mg)/K$ trocável nos solos varia entre 22 e 31, ou valores menores que 40 (Rosolem et al., 1992). Decréscimos na produção ocorrem quando a relação $(Ca+Mg)/K$ é superior a 40 e o K trocável está abaixo do teor crítico, acentuando a deficiência nutricional de K. Em geral, os valores extremos destas relações estão associados aos teores desequilibrados de um destes nutrientes.

Outra situação que também pode ocorrer é o uso sucessivo de elevadas doses de K (iguais ou maiores a 160 kg K_2O/ha),

que promovem a redução da relação $(Ca+Mg)/K$ a valores de aproximadamente 10, conforme reportado por Firmano et al. (2019a) em um Latossolo do estado do Paraná. Apesar das baixas relações $(Ca+Mg)/K$, Firmano et al. (2019a; 2020) observaram estabilização das produtividades de soja quando os teores de K no solo (Mehlich-1) eram maiores que $0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$, concordando com o nível crítico do nutriente para solos com CTC maior do que $5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ (Oliveira Junior et al., 2020).

Conforme se observa na Figura 47, o aumento dos teores de K no solo resulta em decréscimo nos teores de Ca e Mg nas folhas de soja. Não obstante os teores de Ca e de Mg nas folhas não terem diminuído a níveis abaixo dos adequados, o manejo com elevadas doses de K pode intensificar a interação competitiva e o efeito diluição sobre os teores de Ca e de Mg nas folhas. Para solos com teores menores destes dois nutrientes, há reflexos sobre a produtividade por limitação nutricional, indicada pelos teores foliares abaixo do nível adequado.

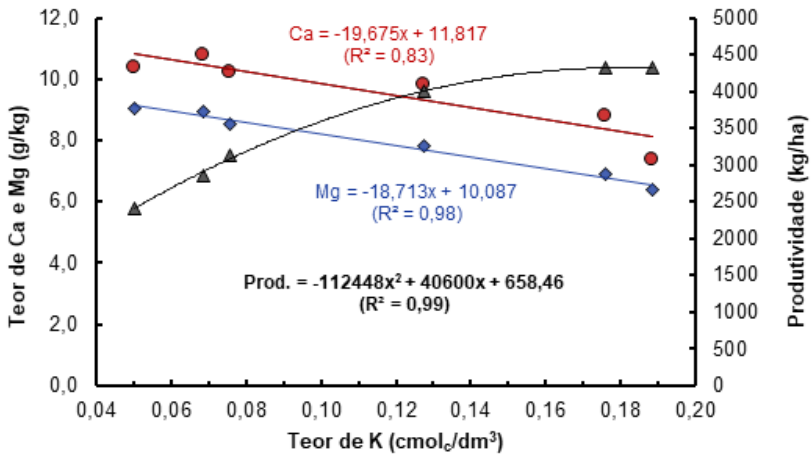


Figura 47. Teores de cálcio, magnésio nas folhas (estádio R2) e produtividade da soja, em função dos teores de K trocável no solo. Londrina-PR, safra 2017/2018.

Fonte: Castro et al. (2020).

O que se depreende das relações Ca, Mg e K, é a importância fundamental dos teores dos nutrientes estarem acima dos teores críticos de suficiência, conforme destacado por Barber (1984), Quaggio ([2000]) e Kopittke e Menzies (2007). Deste modo, mesmo havendo eventual desequilíbrio em relação às proporções ideais, o efeito de competição mútua entre esses cátions não chega a afetar o atendimento da demanda nutricional e a produtividade da soja.

Um conceito que tem sido incorporado ao manejo da fertilidade do solo, é o da adubação de sistema. Dessa forma, a recomendação de adubação deixa de ser realizada por cultura isoladamente e passa a considerar o sistema de produção no qual a cultura está inserida, ajustando-se a adubação em função do balanço de entradas e saídas de nutrientes no sistema, evitando-se tanto o esgotamento do solo quanto à elevação desnecessária da fração disponível de nutrientes no solo (Resende et al., 2019).

É importante ressaltar que o material genético (cultivares/híbridos) que é disponibilizado aos produtores está em processo contínuo de melhoramento e possui potencial produtivo cada vez maior, o que traz a necessidade permanente de ajuste do manejo da fertilidade para garantir a reposição das quantidades de nutrientes exportados, e compatíveis com as produtividades almejadas. Além disso, o monitoramento das concentrações de nutrientes em folhas via análise de tecidos também é uma prática importante para a contínua atualização de classes de interpretação em cultivares modernos.

Não é possível acompanhar a evolução do balanço de nutrientes e, principalmente, o equilíbrio nutricional de um sistema de produção, sem o monitoramento da fertilidade do solo para avaliar, no tempo e no espaço, a variação na disponibilidade dos nutrientes. Especificamente para o K, estudos conduzidos

desde a década de 1980 na Embrapa Soja, em Latossolo Vermelho distroférico, evidenciaram que a disponibilidade de K decresce em média de $0,02 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3/\text{ano}$ em áreas sem aplicação de K (Firmano, et al., 2019a). No entanto, atualmente, com o maior potencial produtivo das culturas, o esgotamento do solo tem sido mais acelerado e a taxa de declínio do nutriente é maior, ocasionando o aparecimento dos sintomas na soja em diferentes áreas.

A redução efetiva da disponibilidade de K trocável, em função de um manejo nutricional inadequado, que leve ao balanço negativo do nutriente, pode ser minimizada pelo poder tampão de K, que determina o equilíbrio do nutriente nas frações trocável e não trocável do solo (Sparks, 1987; Firmano et al., 2019a). Mesmo assim, em balanço negativo ocorre a redução contínua dos teores de K no solo, para níveis abaixo do crítico, com sérias consequências na nutrição das plantas que compõem o sistema de produção.

Em geral, o que tem sido observado nas lavouras com plantas expressando sintomas de desequilíbrio nutricional, é que a adubação com K é rotineiramente menor que a quantidade exportada pelos grãos. Ou ainda, em situações mais graves, não tem sido realizada a aplicação de fertilizantes via formulações com K, por considerar o solo de “alta fertilidade”, levando a problemas posteriores.

Menos evidente, mas igualmente preocupante, é o que acontece em solos com teores abaixo do nível crítico, resultando em plantas malnutridas, limitando a produtividade, sem que o agricultor perceba que a remoção de K do solo desloca o equilíbrio da concentração do nutriente em solução e da fração trocável, com conseqüente depleção de formas não-trocáveis de K, esgotando gradualmente as reservas totais de K do solo. Nesta situação, a adubação necessária para recuperar a

disponibilidade de K do solo deveria exceder as quantidades normalmente recomendadas para a manutenção da lavoura. Isso pois, além da adubação para manter os fluxos do nutriente conforme sua dinâmica natural em solos bem manejados, haverá a necessidade da recomposição das frações exauridas, para o restabelecimento do equilíbrio vinculado ao poder tampão do solo.

Mesmo que os teores de K^+ próximo às raízes sejam variáveis em função das características químicas e mineralógicas do solo, a elevada capacidade da soja em absorvê-lo cria um gradiente de concentração que favorece a passagem de K não trocável para K^+ trocável, podendo exaurir o solo com maior velocidade que em sistemas de produção sem a leguminosa. No caso de sistemas de produção de soja com gramíneas do gênero *Urochloa* no inverno para pastejo, essa exaustão é ainda mais acelerada devido à alta capacidade de absorção de K das gramíneas.

A contribuição da fração não trocável de K para as culturas pode ser constatada na Figura 48A, visto que, sob condições de baixa disponibilidade de K trocável ($0,1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), as cultivares de soja produziram acima de 3000 kg/ha de grãos, quando ainda existia uma “reserva” de K não trocável devido às doses de K previamente aplicadas no experimento (Firmano et al., 2019a). À medida que essa reserva de K não trocável foi sendo exaurida, as produtividades de soja não passaram de 2200 kg/ha.

As mais altas produtividades, alcançando valores acima de 3600 kg/ha, ocorreram principalmente quando a disponibilidade de K trocável no solo estava acima do nível crítico, até 40 cm de profundidade (Figura 48B).

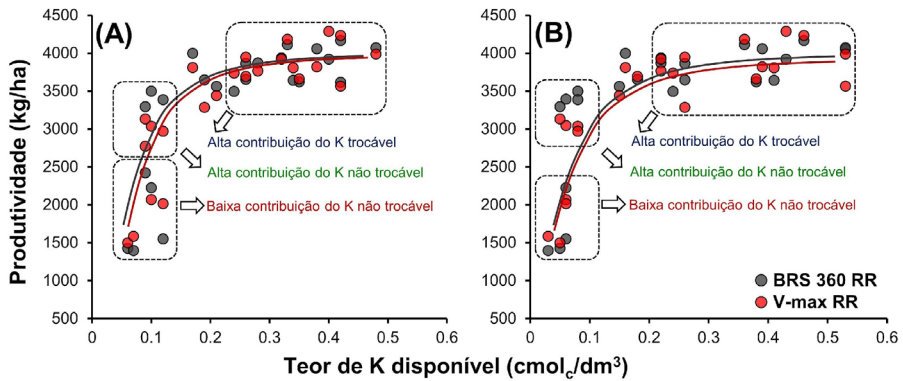


Figura 48. Produtividade de duas cultivares de soja em resposta aos teores trocáveis de K no solo nas camadas de 0-20 cm (A) e 20-40 cm (B), em experimento envolvendo histórico de tratamentos com diferentes regimes de esgotamento das reservas do nutriente no solo. Embrapa Soja, Londrina, PR, safra 2012/2013.

As produtividades observadas na Figura 48 destacam a importância da fração não trocável de K, nas camadas de 0-20 cm e de 20-40 cm, cuja magnitude é dependente da mineralogia do solo. Apesar desta fração de K do solo não ser detectada na análise de solo de rotina, a mesma tem um papel fundamental na disponibilidade de K às plantas, especialmente em áreas mal manejadas.

Com base na descrição do modelo de disponibilidade, a reserva de K não trocável deve ser trabalhada, como o próprio nome diz, como uma reserva ou uma poupança para ser utilizada em momentos críticos. Por exemplo, períodos com aumento no custo do fertilizante, associados a baixa remuneração da cultura (elevada relação de troca fertilizante produto), ou mesmo em condições ambientais altamente propícias ao desenvolvimento da soja.

Outro ponto importante, que se pode abstrair da Figura 48, é a estreita relação entre produtividade e um perfil de solo com teores adequados de nutrientes, até 40 cm de profundidade. Apesar da maior parte das raízes se concentrarem nos primeiros 20 ou 30 cm iniciais do perfil de solo, a busca por aumentar a fertilidade de camadas subsuperficiais é uma boa estratégia, ao longo do tempo. Em campeonatos de produtividade de soja, a quase totalidade dos vencedores em diversas regiões possuíam solos cujos teores trocáveis K até 80 cm de profundidade eram $\geq 0,1 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ (Battisti et al., 2018).

Hylander et al. (1999), avaliando a exploração de raízes de soja em um Argissolo de baixa fertilidade, observaram que devido à alta transpiração da leguminosa é possível que exista acúmulo de K próximo às raízes, algo que não ocorre no milho. Além disso, a soja se mostrou mais responsiva a adubação potássica e isso provavelmente está relacionado com a maior demanda por K em relação a gramíneas (Oliveira Junior et al., 2013).

É preciso ressaltar, contudo, que a comparação acima não se aplica ao caso do cultivo de milho destinado à produção de silagem, quando praticamente toda a parte aérea das plantas é cortada e retirada da lavoura, o que promove intenso esgotamento das reservas de K do solo, uma vez que este nutriente é acumulado em grandes quantidades nos colmos e folhas (Resende et al., 2016). Impacto similar na fertilidade do solo pode ser esperado quando sorgo, milheto ou outras gramíneas forrageiras são colhidos para silagem ou feno. Portanto, se tais gramíneas, com essas finalidades de uso, fazem parte do sistema de produção de soja, a atenção às adubações potássicas deve ser redobrada, com dimensionamento que assegure, no mínimo, a reposição das quantidades totais de K exportadas no sistema em questão.

A importância do potássio nos sistemas de produção

A produção de plantas terrestres deve ser limitada pelo nutriente que está presente no meio ambiente em menor quantidade em relação às suas demandas para o crescimento das plantas.

Lei do mínimo (1840)

Justus von Liebig (1803-1873), Pai da Nutrição Mineral de Plantas

Apesar de a extração de nutrientes pela soja obedecer a ordem de prioridade: $N > K > Ca > Mg > P > S$, e a ordem de exportação (quantidade nos grãos) ser: $N > K > P > Ca = Mg = S$ (Tabela 6), o que se destaca em relação ao manejo do K é a pouca atenção, ou os erros cometidos no manejo de um nutriente fundamental para o sucesso produtivo e econômico das lavouras de soja. Se, para cada tonelada de grãos de soja colhidos e retirados da lavoura, são exportadas, ao redor de 18 kg de K (22 kg de K_2O), estas deveriam ser as quantidades mínimas de reposição para manter a disponibilidade de K do solo.

Tem sido cada vez mais comum os relatos de problemas relacionados ao manejo da fertilidade do solo para a cultura da soja. Dentre as situações mais frequentemente encaminhadas à Embrapa Soja, destacam-se áreas com desuniformidade de desenvolvimento e sintomas de desequilíbrios nutricionais, em especial aqueles associados à deficiência de K. Curiosamente, a maioria das consultas é proveniente de lavouras estabelecidas em solos originariamente férteis, evidenciando o manejo inadequado do solo ao longo do tempo de sua exploração agrícola.

Na Tabela 11, são apresentados alguns exemplos de resultados das análises de solo de diferentes lavouras comerciais

com problemas de fertilidade do solo nas últimas safras. Observa-se que, não obstante existirem problemas generalizados de desequilíbrios nutricionais, o K é o nutriente que mais se destaca, afetando negativamente o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, a produtividade da lavoura.

Tabela 11. Resultados de análise de solo de diferentes lavouras de soja em áreas com sintomas de desequilíbrio nutricional no estado do Paraná (safras 2015/2016, 2016/2017 e 2018/2019).

Amostra ¹	pH ¹	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTC	V	P	$\frac{(Ca+Mg)}{K}$
		cmol _c /dm ³					%	mg/dm ³	
1	5,8	6,8	5,4	1,5	0,37	14,1	52	9	19
2	5,7	6,8	5,9	1,4	0,06	14,2	52	15	122
3	6,0	2,6	6,4	2,0	0,18	11,2	76	5	46
4	5,8	3,0	6,3	2,0	0,06	11,3	74	7	137
5	5,2	2,5	2,6	0,8	0,08	5,9	57	28	42
6	5,1	2,6	2,4	0,8	0,05	5,9	56	16	64
7	6,0	2,3	7,7	3,1	0,22	13,3	83	10	49
8	5,9	2,4	6,4	2,6	0,07	11,4	80	7	129
9	5,4	2,7	4,9	1,9	0,15	9,6	72	24	45
10	5,4	2,7	4,3	2,2	0,06	9,3	71	14	108
11	4,7	5,0	6,1	1,8	0,05	12,9	62	5	158
12	4,9	2,2	10,4	2,1	0,07	14,7	85	13	178
13	5,6	3,4	4,9	1,3	0,16	9,8	65	43	38

¹ pH em solução extratora de CaCl₂ 0,01M, na relação 1:2,5.

² As amostras 1 a 13 são de áreas nas mesorregiões paranaenses: Norte Central, Oeste, Noroeste, Norte pioneiro e Central.

As amostras de 1 a 10 foram coletadas em pares (área com sintomas e sem sintomas de deficiência de K) e representam cinco propriedades agrícolas, com problemas nutricionais e sintomas de amarelecimento das folhas do terço superior das plantas, em solos com textura argilosa e arenosa. As demais amostras foram coletadas apenas nas áreas com sintomas. Apesar da evidente condição visual característica da deficiência de K (amarelecimento foliar na forma de 'V' invertido, ou cunha), aspectos diversos relacionados ao manejo do solo e até a estresses bióticos por doenças foram apontados pelos produtores/técnicos de assistência como prováveis agentes causais das anomalias. Entretanto, somente com a análise de solo de áreas contrastantes foi possível concluir o diagnóstico correto e recomendar a intervenção de manejo do solo adequada.

Nas análises de áreas com e sem problemas nutricionais, muitas vezes a área que aparentemente não possui problemas, tem teores de K no solo baixos, sem, contudo, apresentar os sintomas mais destacados da desordem nutricional. Os teores de K no solo (Tabela 11) e nas folhas (Tabela 12) de algumas amostras, são bons exemplos do que se conhece por fome oculta, afetando a produtividade sem que o agricultor perceba qual é o principal fator limitante.

Tabela 12. Resultados de análises químicas de macro e micronutrientes de amostras de folhas¹ coletadas em lavouras de soja com e sem sintomas de deficiência nutricional, no estado do Paraná (safras 2015/2016, 2016/2017 e 2018/2019).

Amostras de Folhas*		N	P	K	Ca	Mg	S	Zn	Mn	Fe	Cu	B
Sintomas		g/kg						mg/kg				
1a	Sem	43	2,3	11	13	1,4	1,6	27	200	724	7,0	29
1b	Com	37	1,8	2	27	10,3	1,6	23	214	194	4,0	49
2a	Sem	39	2,0	10	12	3,1	2,4	26	85	162	6,5	40
2b	Com	30	1,7	5	17	6,5	1,8	18	101	239	4,5	43
3a	Sem	39	2,5	10	15	2,1	2,4	23	89	87	6,4	27
3b	Com	31	2,0	5	22	5,9	1,8	22	113	82	3,9	28
4a	Sem	37	2,7	13	14	3,5	1,7	28	98	182	7,4	32
4b	Com	28	2,3	5	21	8,8	1,3	23	169	297	5,5	36
5a	Sem	26	2,4	16	13	2,6	1,6	32	78	111	7,8	29
5b	Com	26	2,4	6	22	10,6	1,2	34	155	116	5,5	44
6a	Com	37	2,7	4	30	10,1	2,3	63	238	250	15,3	73
6b	Com	39	2,9	4	17	8,4	1,7	66	101	408	10,1	86
7a	Sem	44	2,8	7	21	3,8	2,4	33	153	595	9,5	55
7b	Com	27	1,5	3	24	6,6	1,4	21	167	626	5,3	68

¹ As amostras de folhas foram colhidas nos estádios reprodutivos (R5 a R6). Portanto, os teores dos nutrientes estão abaixo dos níveis críticos, principalmente para os nutrientes móveis.

Segundo Parvej et al. (2015), a perda de rendimento medida em condições de campo, atribuída à deficiência de K, variou de 13% a 15%, e esta porcentagem pode ser representativa nas perdas em lavouras de soja com fome oculta ou em áreas com sintomas de deficiência no final do ciclo da cultura. Segundo os mesmos autores, a redução da produtividade foi

afetada principalmente pelo menor número de grãos por planta, que é consequência do menor número de vagens/planta, e maior número de sementes abortadas.

O que se desprende da avaliação agrônômica destes resultados de análises de solo é a despreocupação com o monitoramento da fertilidade do solo para acompanhar a variação na disponibilidade dos nutrientes ao longo do tempo. A presença de teores tão baixos de K no solo não é decorrente do manejo inadequado da adubação em apenas uma safra, mas sim, por uma sequência de cultivos agrícolas com manejo incorreto da adubação. As falhas mais prováveis que levam a tal situação podem ser a ausência de um monitoramento efetivo da fertilidade do solo ou equívocos na interpretação das análises e na definição do programa de adubação, que resultaram no balanço negativo entre as entradas (adubação) e saídas dos nutrientes (exportação dos grãos) na lavoura.

De modo geral, nas análises de solo apresentadas na Tabela 11, além das deficiências de K, observam-se problemas com outros nutrientes, saturação por bases e relações entre nutrientes, indicando falta de acompanhamento técnico efetivo e responsável da fertilidade do solo, base para um bom manejo nutricional das culturas.

Se a ausência de sintomas pode favorecer erros de diagnose, a deficiência nutricional pode ser acertadamente comprovada utilizando-se uma ferramenta poderosa que é análise foliar, cujo resultado é interpretado comparando-se com uma “tabela de concentrações de referência” ou também pelo índice DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação).

Na Tabela 12 são apresentados resultados de análises de folhas das mesmas áreas da Tabela 11, que apresentavam folhas com clorose no terço superior, muitas vezes ocorrendo em reboleiras.

É interessante observar que nas amostras de 1 a 10, que correspondem às áreas com plantas com e sem sintomas, observam-se teores de K classificados como muito baixos, e menores que aqueles esperados mesmo para os estádios R5 e R6. Os teores de K em folhas das amostras com problemas, e que motivaram os agricultores a enviarem as plantas para a Embrapa, são de 2 a quase 6 vezes menores do que os teores nas plantas visualmente sem problemas (Tabela 12).

Na amostra 11, além do baixo teor de K, destacam-se os altos teores de Zn, Cu e B nas folhas. Na lavoura da amostra 12, apesar das áreas com plantas amarelas estarem aumentando ao longo das últimas safras, o agricultor fazia o manejo da adubação com a mesma fórmula e dosagem, fornecendo 35 kg de K_2O /ha, quantidade insuficiente para atender as quantidades normalmente exportadas pelos grãos (Figura 49). Para esse tipo de manejo é bem adequada a frase: “Incoerência é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes”.

Como axioma do manejo “omisso” da adubação potássica vale a pena lembrar; “não existe almoço grátis”. Não há mágica na agricultura, mais difícil ainda, a transmutação de elementos e, portanto, uma verdade incontestável é: se a demanda das plantas não for atendida pela aplicação de fertilizantes, será, direta ou indiretamente, pelo solo, com conseqüente depleção das reservas ou “poupança” de K no ambiente de produção. Tal situação é mais comum no campo do que se imagina e o desafio técnico consiste em diagnosticá-la e corrigi-la o quanto antes, sob risco de se incorrer num círculo vicioso, com prejuízos eminentes à produtividade e à própria sustentabilidade do sistema de produção.

Fotos: Ruan Francisco Firmiano



Figura 49. Plantas de soja com sintomas de deficiência de potássio, mais acentuadamente nas folhas superiores (Tabela 11 - amostra 12).

As amostras 13.1 e 13.2 (Tabela 12), referem-se as plantas em áreas aparentemente normais e reboleiras com folhas amareladas. No entanto, a análise de solo correspondente (Tabela 11 - amostra 13), indica que o teor de K era $0,16 \text{ cmol/dm}^3$, que apesar do teor médio de K (Oliveira Junior, et al., 2020), não seria de se esperar o aparecimento de sintomas de deficiência de K. Isso demonstra a importância da amostragem criteriosa e representativa da área.

No caso dessa área, os sintomas de deficiência estavam progredindo com os cultivos sucessivos, mas o agricultor não desconfiava da origem do problema. Ele não associava o padrão de distribuição e posição dos sintomas nas plantas com a provável deficiência de K e acreditava que o solo era fértil e o manejo da adubação adequado. Uma avaliação mais criteriosa das quantidades de nutrientes fornecidos e da produção de grãos (balanço da adubação), além das análises de solo e de tecido, seriam suficientes para antecipar a solução do problema, corrigir a adubação e elevar a produtividade da área em questão.

Em se tratando do manejo da adubação potássica em sistemas de produção mais diversificados, é fundamental que se conheçam as particularidades da dinâmica interna e da demanda nutricional associadas às diferentes espécies vegetais envolvidas. Para a produção do girassol, por exemplo, a disponibilidade de K no solo deve ser de média a alta, já que a demanda da cultura é elevada, em torno de 170 kg de K_2O na parte aérea, para cada tonelada de grãos produzida (Castro; Oliveira, 2005). Contudo, a quantidade de K que é exportada através dos aquênios na colheita é baixa, alcançando, em torno de 7,0 kg de K_2O por tonelada produzida.

Desta maneira, a baixa disponibilidade de K no solo pode causar diminuição gradativa do crescimento das plantas, com redução da produtividade, mesmo sem os sintomas típicos da deficiência. Porém, quando a deficiência de K é mais severa, os sintomas se iniciam com mosqueado amarelado nas bordas das folhas da parte inferior da planta (Figura 50). Essas áreas cloróticas avançam para o centro das folhas, tornando-se necróticas nas bordas das folhas. Em caso mais severos, a planta perde a rigidez, prostrando-se facilmente.

A sintomatologia da deficiência de K no milho foi apresentada no capítulo 5 e, até certo ponto, é similar ao padrão observado para as espécies gramíneas.

Foto: Fábio Alvares de Oliveira



Figura 50. Sintomas de deficiência de K nas folhas baixeras da planta de girassol.

Os exemplos de deficiência de K em soja e outras culturas associadas aos sistemas de produção mostram a importância do manejo da fertilidade que efetivamente atenda às necessidades globais dos sistemas de produção, de modo que nenhuma cultura venha a ser penalizada no atendimento de suas

exigências nutricionais. Os resultados obtidos em parcelas experimentais e em lavouras comerciais indicam que a necessidade de uma eventual reconstrução das reservas de nutrientes do solo é muito mais cara do que o monitoramento periódico da lavoura para orientar a manutenção de condições satisfatórias de fertilidade.

Potássio e a qualidade da produção

As plantas são afetadas principalmente pelo solo, mas também pela água, ar e o calor do sol. Esta é a razão pela qual as plantas podem diferir umas das outras em vários países, embora todas elas sejam constituídas pelos mesmos quatro elementos. Os grãos que crescem em Babil são mais nutritivos e têm uma natureza mais equilibrada.

The last pagans of Iraq: Ibn Wahshiyya and his Nabatean Agriculture (~ início século X).

Hämeen-Anttila (2006)

Segundo Borkert et al. (1989) e Cakmak (2005b), a deficiência de K é um importante problema nutricional que afeta a produção e a qualidade dos grãos e frutos das colheitas. Borkert et al. (1989) citam que, além da mais baixa produtividade, plantas com deficiência de K desenvolvem grãos pequenos, enrugados e deformados. Na Figura 51, evidenciam-se tais sintomas em uma amostra de grãos colhida em área de fertilidade limitante, com $0,06 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de K disponível no solo de textura muito argilosa.

Foto: César de Castro



Figura 51. Grãos de soja colhidos em áreas de lavoura com sintomas graves de deficiência de K devido à baixa disponibilidade do nutriente no solo.

Vyn et al. (2002) citam a importância da nutrição potássica para aumentar a produção de soja, e simultaneamente, a qualidade dos grãos, como o teor total de isoflavona, especialmente a daidzeína e a genisteína. A relação direta entre produtividade de grãos/sementes e a concentração total de isoflavonas é muito positiva, pois sugere que o alto rendimento da soja pode ser compatível com sua alta qualidade funcional. Estas informações, bem como estudos de Carrera et al. (2021), demonstram a importância desses compostos fisiologicamente ativos e

com grande valor nutracêutico. Com base na dinâmica de acúmulo de isoflavonas nos grãos, é possível determinar a época de colheita mais adequada para obter grãos à indústria de alimentos funcionais. Um exemplo é a produção de edamame, ou “soja verde”, cujas vagens são colhidas em R6. Os grãos de soja são utilizados na alimentação humana, especialmente em países asiáticos, e a demanda cresce no Brasil, principalmente nos grandes centros urbanos, assim como em outros países ocidentais.

Outra questão relativa ao impacto da deficiência de K na qualidade dos grãos, deve-se ao atraso no ciclo da cultura e na maturação das plantas, podendo causar distúrbios como haste verde, retenção foliar e vagens chochas, bastante comuns nas lavouras de soja (Borkert et al., 1989). Pelo fato de as plantas permanecerem mais tempo no campo, pode ocorrer maior incidência de ataque de percevejos, com decorrente aumento dos danos às sementes e até intensificando o problema de haste verde (Borkert et al., 1987). Estas plantas também permanecem mais tempo expostas ao ataque da ferrugem asiática pelo atraso na maturação.

Em adição, experimentos com doses de K e combinações de doses de P e K, conduzidos desde 1989 em Londrina-PR, comprovam que os tratamentos com baixos teores de K no solo e limitações nutricionais mais graves, aumentam a severidade das doenças de final de ciclo, com perda de área foliar e redução do ciclo por senescência e morte das plantas. Este mesmo comportamento é observado em lavouras comerciais, facilmente identificado pelas reboleiras ou áreas mais extensas, com amarelecimento prematuro e queima das folhas, redução do aparato fotossintético, progredindo para necrose e folíolos quebradiços e, em casos mais severos, com aparência esfarrapada (Figura 42).

A desuniformidade no desenvolvimento e na maturação das plantas pode afetar a densidade e a qualidade dos grãos originados de áreas deficientes em K, com consequências negativas para os processos de pós-colheita e para o armazenamento de grãos. Observa-se na Figura 52, o aspecto visual dos grãos em função de tratamentos com doses de K (0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg de K_2O/ha). A aplicação dos tratamentos, ao longo de 32 anos, promoveu um gradiente na disponibilidade de K no solo, desde $0,05 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ até $0,54 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ (Firmanno et al., 2019a), cujos teores são interpretados como muito baixo até muito alto (Oliveira Junior et al., 2020).

Foto: César de Castro

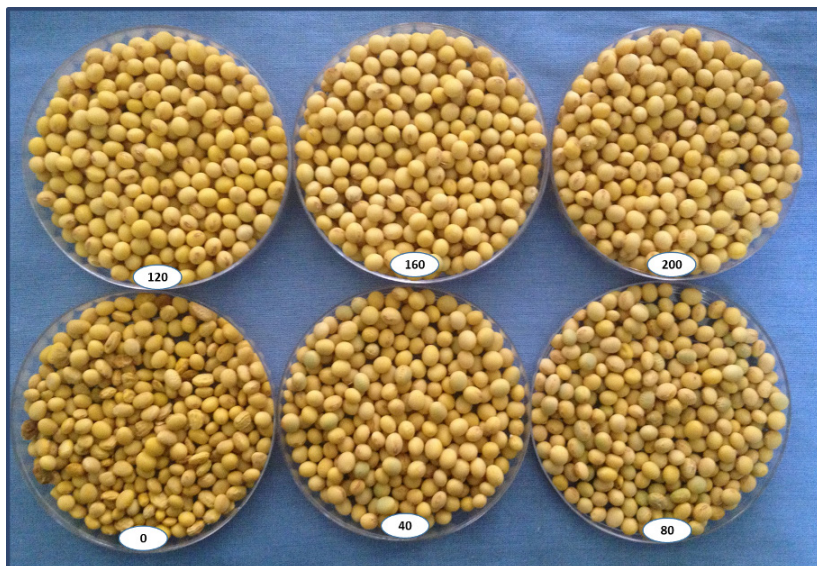


Figura 52. Grãos de soja colhidos em área experimental com doses de K (0, 40, 80, 120, 160 e 200 kg/ha de K_2O). Londrina-PR.

Uma avaliação pormenorizada do efeito da deficiência de K na qualidade dos grãos pode ser observada na Figura 53. Nesta, a soja foi colhida separando-se os grãos do terço inferior, médio e superior das plantas. Quando o solo apresentava baixo teor de K ($0,06 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), a massa média de 100 grãos dos terços inferior, médio e superior atingiram, em média, 14,8, 14,6 e 13,6 g, respectivamente, e as plantas expressaram sintomas de deficiência de K durante o ciclo. Já no tratamento com teor de K no solo acima do nível crítico ($0,31 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), não se verificaram diferenças para os valores médios da massa de 100 grãos, que foram de 15,8, 15,9 e 15,6 g nos terços inferior, médio e superior, respectivamente. Neste caso, não foram observados sintomas visuais de deficiência de K durante o desenvolvimento das plantas.

Os menores valores de massa de 100 grãos, associadas aos baixos teores de K nos grãos, são indicativos claros do quanto a manutenção de teores adequados de K no solo pode afetar a produtividade (Bharati et al., 1986) e a qualidade dos grãos. No que se refere aos programas de melhoramento e produtores de sementes, esses atributos podem ser um fator de seleção e de segregação das sementes para comercialização, visto que, segundo Li e Burton (2002), a densidade de sementes é positivamente correlacionada com o conteúdo de proteína e o peso de sementes, o qual está diretamente associado ao rendimento. Reforçando este conceito, Abbasi et al. (2012) destacaram a importância da adubação com P e K para o aumento da produtividade e das concentrações de óleo e proteína nos grãos de soja.

Foto: César de Castro

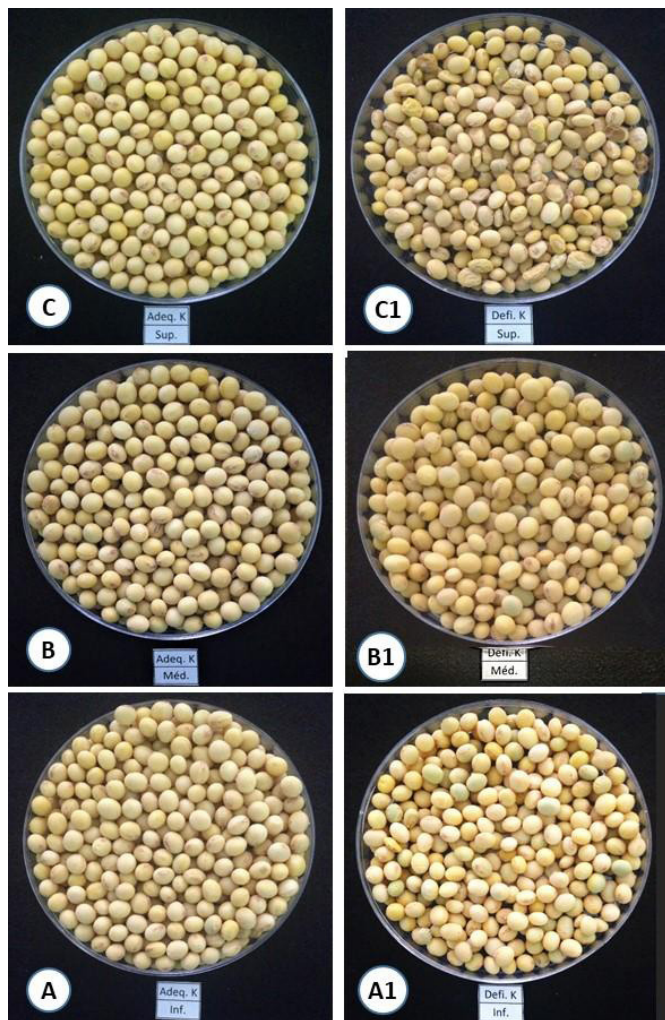


Figura 53. Grãos de soja do terço inferior (A e A1), médio (B e B1) e superior (C e C1) de plantas de soja, colhidos em áreas experimentais com alta (0,31 cmol/dm^3) e baixa (0,06 cmol/dm^3) disponibilidade de K no solo, respectivamente. Londrina-PR.

A Figura 54 reforça a importância do manejo da adubação potássica na qualidade da produção. Experimentos conduzidos em Londrina, desde a década de 1980 demonstram o efeito negativo da baixa disponibilidade de K no solo e a qualidade e massa de sementes.

Foto César de Castro



Figura 54. Grãos de soja colhidos em área experimental com baixo ($0,11 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ - A) e alto ($0,35 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ - B) teor de potássio no solo, safra 2012/2013. Londrina-PR.

Na Figura 55A, são apresentadas as relações do nível de disponibilidade de K em solo de textura muito argilosa (aproximadamente 750 g/kg de argila) e sem problemas de compactação, com os teores do nutriente nas folhas e nos grãos. Na Figura 55B, são apresentadas as relações entre a massa de 100 grãos e a produtividade da soja. Com o aumento da disponibilidade de K no solo, verificou-se um aumento seguido de estabilização dos teores de K nas folhas e grãos (Figura 55A) e, de forma semelhante, para a massa de 100 grãos e para a produtividade, os incrementos foram mais notáveis até $\sim 0,14 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ de K no solo (Figura 55B).

Salienta-se que a manutenção de mais alta reserva de K no solo é fundamental para garantir produtividade com qualidade dos grãos, além de ser uma estratégia mais segura para a estabilidade produtiva nos anos de baixa disponibilidade hídrica ou anos com alta nos preços de fertilizantes, quando normalmente o produtor diminui a adubação.

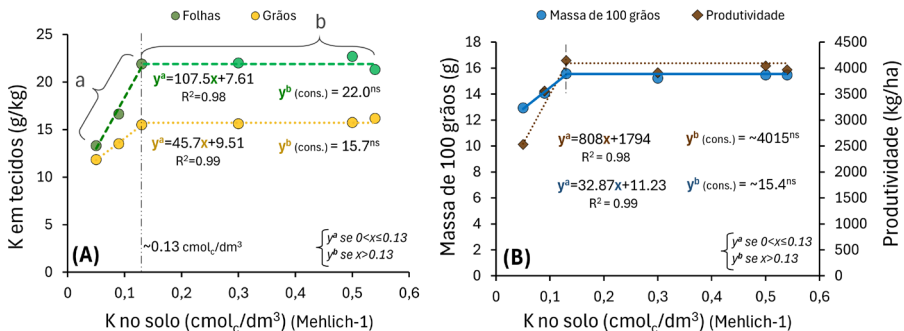


Figura 55. Relações do nível de disponibilidade de K no solo com os teores do nutriente em folhas e grãos (A), e da massa de 100 grãos com a produtividade da soja (B). Londrina-PR, safra 2017/2018.

França Neto et al. (1985) citaram o efeito do fornecimento adequado de K sobre a qualidade da semente de soja, com melhorias na germinação, no vigor, na emergência e no resultado do teste de tetrazólio, reduzindo o envelhecimento precoce e aumentando o peso de 100 sementes. Outra questão importante, mas não perceptível visualmente, é que plantas cultivadas em solos com baixa disponibilidade de K e em condições de estresses abióticos como seca, salinidade e altas temperaturas são mais suscetíveis à redução na taxa fotossintética, podendo ainda, acumular sódio nas células, causando estresse oxidativo durante os processos da fotossíntese (Cakmak, 2005a).

O aumento da resistência da soja ao ataque de pragas e doenças também está relacionada ao manejo adequado da adubação potássica. Estudos clássicos de nutrição mineral de

plantas (Kiraly, 1976; Perrenoud, 1977; Sugimoto et al., 2009) mostram que o suprimento adequado de K às plantas confere maior resistência às doenças. Contudo, mais importante do que o fornecimento de K às plantas, pode ser o equilíbrio entre os nutrientes, por exemplo, N e K. Uma vez que a alta relação K/N faz com que compostos solúveis de baixo peso molecular como aminoácidos e açúcares, os quais são substratos nutricionais de pragas e doenças (Figura 16), sejam convertidos em compostos de alto peso molecular como proteínas, amido e celulose, aumentando a resistência da planta ao ataque de pragas e doenças (Römheld, 2005; Marschner, 2012).

França Neto et al. (1991) concluíram que a qualidade fisiológica, física e sanitária das sementes foi significativamente superior nos tratamentos com doses adequadas de K, ao redor de 80 kg/ha de K_2O e teores de K no solo acima do nível crítico. No mesmo trabalho, foi observada a maior incidência de danos por percevejo, deterioração por umidade e *Phomopsis* spp., nas sementes provenientes dos tratamentos com as menores doses de K.

Atualmente, o ataque de percevejos em lavouras de soja tem sido uma das grandes preocupações dos agricultores, não só pelos danos inerentes ao ataque do inseto, como também pelo pequeno número de produtos ou estratégias viáveis para a melhor convivência com a praga. No final da década de 1980, Borkert et al. (1987, 1989) relataram a melhoria da qualidade da semente e o menor dano por percevejos às sementes, pela adubação potássica, em solo com baixa disponibilidade inicial de K.

Balardin et al. (2006) concluíram que plantas supridas adequadamente com P e K sofreram menos danos ao ataque da ferrugem da soja. Também, no caso de má distribuição do

fertilizante potássico, seja pelo subdimensionamento da faixa de aplicação ou de outras falhas na distribuição, é possível verificar diferenças na severidade do ataque deste fungo em lavouras comerciais (Zancanaro, 2004).

Segundo Gao et al. (2018), estudos desenvolvidos em condições controladas ou de campo indicam que o K induz múltiplos mecanismos para melhorar a resistência da soja ao nematoide de cisto *Heterodera glycines*, tanto nos aspectos fisiológicos quanto moleculares, o que pode constituir uma estratégia para conviver melhor com este nematoide, pela aplicação de doses equilibradas do nutriente. Os autores observaram que na presença de K as plantas exsudaram mais ácidos fenólicos e produziram mais genes relacionados à proteção contra patógenos. Outro resultado notável de Gao et al. (2018) foi que a aplicação de doses ótimas reduziu de maneira drástica a disponibilidade de *H. glycines*, ao passo que o uso de doses excessivas não foi útil no controle do nematoide. Hanson e Charles (2008) também observaram efeito positivo do uso de KCl na redução dos sintomas do ataque de *H. glycines* em determinadas cultivares de soja, sem efeitos na massa de raízes.

Quanto aos nematoides, Freitas et al. (2017) concluíram que as populações de *Pratylenchus brachyurus* em lavouras de soja são influenciadas por atributos químicos do solo, especialmente P, Ca, MO e K. Assim, a carência desses atributos leva ao mau desenvolvimento das raízes, tornando-as mais suscetíveis ao ataque de nematoides. Leiva et al. (2020) observaram correlação negativa entre a população de *Pratylenchus* com a soma de bases, micronutrientes e potássio, confirmando a maior atividade deste nematoide em solos arenosos e de menor fertilidade.

Considerações finais

O agronegócio é uma das atividades econômicas com maior impacto na sociedade brasileira, não só pelo seu dinamismo e importância no produto interno bruto (PIB) e na balança comercial, como também pelas questões de segurança alimentar, melhoria da qualidade de vida no campo e nas cidades.

O Brasil, com sua forte e crescente tradição agrícola, experimentou alguns ciclos econômicos desde o período colonial, incluindo o ciclo extrativista do pau Brasil, da cana-de-açúcar e, no final do Império e início da República, os ciclos do cacau, do café e da borracha. Uma característica comum permeia nossa história agrícola: infelizmente, ela é pautada, em grande parte, em produtos com pouco valor agregado. O tempo passa, muitos discursos são feitos e poucas mudanças ocorrem. Mais recentemente, principalmente, a partir do terceiro quartil do século XX, consolidou-se o ciclo da soja, cujo modelo ainda apresenta algumas características dos ciclos econômicos anteriores, pois mais de 80% da soja é vendida em grãos. Isso é altamente preocupante, pois exportamos inclusive empregos e temos total dependência de fertilizantes importados, especialmente os potássicos. Contudo, acreditamos que o ciclo da soja será mais duradouro devido à diversidade de produtos e aplicações que a soja é capaz de fornecer.

A fragilidade da produção interna de fertilizantes impõe ao Brasil uma forte dependência de um grupo reduzido de países e corporações, uma ameaça não só à segurança alimentar, mas também à segurança econômica do País. Hoje, o Brasil importa cerca de 95% do potássio. Portanto, trata-se de um obstáculo gigantesco, que demanda soluções de manejo nutricional viáveis e inteligentes, além de estratégias factíveis de produção de fontes nutricionais à altura dos desafios que nos confrontam.

Apesar dos problemas políticos ou econômicos, as atitudes de alguns agricultores parecem pouco críveis. Se são exportados pelos grãos 22 kg de K_2O para cada tonelada produzida, porque alguns agricultores não aplicam, no mínimo, as mesmas quantidades exportadas pelos grãos? No presente trabalho, estão disponíveis várias informações precisas, tabelas e esquemas de adubação sobre o tema. Não fazer uso dessas informações é uma prova cabal do que está disposto no parágrafo abaixo.

Independente do grau de sucesso já alcançado no processo produtivo, é comum aos agricultores a constante busca por inovações e supostas técnicas alternativas de produção, mesmo que estas não tenham comprovação científica, o que certamente pode subtrair parte dos lucros em vez de aumentar a sustentabilidade do empreendimento. O mais impressionante é que ainda convivemos com problemas de manejo relativamente simples, como o abandono de estratégias baseadas em avaliações agronômicas triviais (análises de solo e de tecido foliar), como se pudéssemos pular etapas ou dispensar conceitos sólidos, já consagrados e imprescindíveis. Os resultados desse comportamento são desequilíbrios nutricionais em diferentes lavouras, tipos de solo e condições de cultivo, com danos ao metabolismo das plantas, perda do potencial produtivo e da qualidade dos grãos, não só da soja, como das culturas que compõem os sistemas de produção.

Há algum tempo, o Brasil vem sendo desafiado a galgar níveis mais elevados de sustentabilidade na produção agropecuária, tanto por pressão da sociedade consumidora, quanto por questões de interesses econômicos internacionais, segundo a dinâmica da geopolítica mundial. Felizmente, décadas de pesquisa agropecuária brasileira geraram bons frutos, e muitas fazendas evoluíram na vanguarda das boas práticas de manejo,

demonstrando ser factível conciliar alta produtividade e rentabilidade, com o uso eficiente dos recursos naturais e insumos, conservando a fertilidade do solo, a qualidade ambiental e a prosperidade social.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro de FNDCT/CT-AGRO/FINEP (Convênio 01.22.0080.00, Ref. 1219/21).

Referências

ABBASI, M. K.; TAHIR, M. M.; AZAM, W.; ABBAS, Z.; RAHIM, N. Soybean yield and chemical composition in response to phosphorus-potassium nutrition in Kashmir. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 1476-1484, 2012. DOI: 10.2134/agronj2011.0379.

ALVARENGA, M. I. N.; LOPES, A. S. Influência da adubação potássica no equilíbrio de cátions em Latossolo roxo distrófico, fase cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 23, p. 347-355, 1988.

AMTMANN, A.; TROUFFLARD, S.; ARMENGAUD, P. The effect of potassium nutrition on pest and disease resistance in plants. **Physiologia Plantarum**, v. 133, p. 682-691, 2008. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2008.01075.x.

ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes 2023**. São Paulo, 2024. 120 p.

ANJANADEVI, I. P.; JOHN, N. S.; JOHN, K. S.; JEEVA, M. L.; MISRA, R. S. Rock inhabiting potassium solubilizing bacteria from Kerala, India: Characterization and possibility in chemical K fertilizer substitution. **Journal of Basic Microbiology**, v. 56, p. 67-77, 2016. DOI: 10.1002/jobm.201500139.

- ANTONANGELO, J. A.; FIRMANO, R. F.; ALLEONI, L. R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; ZHANG, H. Soybean production under continuous potassium fertilization in a long-term no-till oxisol. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 2462-2471, 2019. DOI: 10.2134/agronj2019.02.0084.
- BAILEY, J. S.; BEATTIE, J. A. M.; KILPATRICK, D. J. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: I. Model establishment. **Plant and Soil**, v. 197, p. 127-135, 1997. DOI: 10.1023/A:1004236521744.
- BALARDIN, S. R.; DALLAGNOL, J. L.; DIDONÉ, T. H; NAVARINI, L. influência do fósforo e do potássio na severidade da ferrugem da soja *Phakopsora pachyrhizi*. **Fitopatologia Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 462-467, 2006.
- BALOGH-BRUNSTAD, Z.; KELLER, C. K.; DICKINSON, J. T.; STEVENS, F.; LI, C. Y.; BORMANN, B. T. Biotite weathering and nutrient uptake by ectomycorrhizal fungus, *Suillus tomentosus*, in liquid-culture experiments. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 72, n. 11, p. 2601-2618, 2008. DOI: 10.1016/j.gca.2008.04.003.
- BARBER, S. A. Mecanismos de absorção de potássio por plantas no solo. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1982, Londrina. **Potássio na agricultura brasileira**: anais. Piracicaba: Instituto da Potássio & Fosfato: Instituto Internacional da Potássio, 1982. p. 213-226.
- BARBER, S. A. Mechanism of potassium absorption by plants. In: KILMER, V. J.; YOUNTS, S. E.; BRADY, N. C. (ed.). **The role of potassium in agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1968. cap. 14. DOI: 10.2134/1968.roleofpotassium.c14.
- BARBER, S. A. Potassium. In: BARBER, S. A. (ed.). **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. New York: John Wiley, 1984. p. 229-248.
- BATES, T. E. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. **Soil Science**, v. 112, n. 2, p. 116-130, 1971.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; PASCOALINO, J. A. L.; SAKO, H.; DANTAS, J. P. de S.; MORAES, M. F. Soybean yield gap in the areas of yield contest in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 12, p. 159-168, 2018. DOI: 10.1007/s42106-018-0016-0.

BEAUFILS, E. R. **Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS): a general scheme for experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition**. Pietermaritzburg: University of Natal, 1973. 132 p. (Soil Science Bulletin, n.1).

BELL, M. J.; RANSOM, M. D.; THOMPSON, M. L.; HINSINGER, P.; FLORENCE, A. M.; MOODY, P. W.; GUPPY, C. N. Considering soil potassium pools with dissimilar plant availability. In: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (ed.). **Improving potassium recommendations for agricultural crops**. Cham: Springer, 2021. p. 163-190. DOI: 10.1007/978-3-030-59197-7_7.

BENITES, V. de M.; CARVALHO, M. da C. S.; RESENDE, A. V.; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. de. Potássio, cálcio e magnésio. In: SIMPÓSIO SOBRE BOAS PRÁTICAS PARA USO EFICIENTE DE FERTILIZANTES, 2009, Piracicaba. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: anais**. Piracicaba: IPNI, 2010. v. 2. p. 133-204.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ROMERA, J.; CRISTESCU, S.; HARREN, F.; FOURNIER, J. M.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure via ethylene synthesis in sunflower plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 4, p. 1139-1145, 2010. DOI: 10.1093/jxb/erp379.

BERINGER, H.; NOTHDURFT, F. Effects of potassium on plant and cellular structures. In: MUNSON, R. D. (ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1985. p. 335-367. DOI: 10.2134/1985.potassium.c14.

BEVERLY, R. B. DRIS diagnoses of soybean nitrogen, phosphorus, and potassium status are unsatisfactory. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, n. 8, p. 1431-1447, 1993. DOI: 10.1080/01904169309364625.

BHANDAL, I. S.; MALIK, C. P. Potassium estimation, uptake, and its role in the physiology and metabolism of flowering plants. **International Review of Cytology**, v. 110, p. 205-254, 1988.

BHARATI, M. P.; WHIGHAM, D. K.; VOSS, R. D. Soybean response to tillage and nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization.

Agronomy Journal, v. 78, p. 947-950, 1986. DOI: 10.2134/agronj1986.00021962007800060002x.

BORKERT, C. M.; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de. O potássio na cultura da soja. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2004, São Pedro, SP. **Anais...** Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fostato, 2005. p. 671-722.

BORKERT, C. M.; COSTA, N. P. da; FRANÇA NETO, J. de B.; SFREDO, G. J.; HENNING, A. A. Potassium fertilization reduces disease and insect damage in soybeans. **Better Crops International**, v. 3, n. 2, p. 3-5, 1987.

BORKERT, C. M.; FRANÇA NETO, J. de B.; HENNING, A. A. Potassium fertilization reduces seed infection by *Phomopsis* sp. and improves seed quality. In: WORLD SOYBEAN RESEARCH CONFERENCE, 4., 1989, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: Asociación Argentina de la Soja, 1989. p. 2265-2275.

BORKERT, C. M.; YORINORI, J. T.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; ALMEIDA, A. M. R.; FERREIRA, L. P.; SFREDO, G. J. Seja doutor da sua soja. **Informações Agrônomicas**, n. 66, 1994. 16 p. (Arquivo do Agrônomo, 5).

BOSSOLANI, J. W.; MENEGHETTE, H. H. A.; SANCHES, I. R.; SANTOS, F. L. dos; PARRA, L. F.; LAZARINI, E. 5-year effects of potassium fertilization levels on nutrition balance and yield in the maize/soybean succession.

Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 53, n. 16, p. 2017-2028, 2022. DOI:10.1080/00103624.2022.2070192.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano Nacional de Fertilizantes 2050**. Brasília: SAE, 2021. 195 p.

CAKMAK, I. Protection of plants from detrimental effects of environmental stress factors. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2005, São Pedro. **Potássio na agricultura brasileira: anais**. Piracicaba: Potafos, 2005a. p. 239-260.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, p. 521-530, 2005b.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106). edição revista e atualizada.

CARRERA, C. S.; URRETABIZKAYA, N.; MANDARINO, J. M. G.; LEITE, R. S.; SZEMRUCH, C.; RONDANINI, D. P. Soybean seed and pod isoflavones accumulation during the late reproductive period. **Revista de Investigaciones Agropecuarias**, v. 47, p. 338-343, 2021.

CARVALHAIS, L. C.; DENNIS, P. G.; FEDOSEYENKO, D.; HAJIREZAEI, M. R.; BORRIS, R.; VON WIRÉN, N. Root exudation of sugars, amino acids, and organic acids by maize as affected by nitrogen, phosphorus, potassium, and iron deficiency. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 174, p. 3-11, 2011. DOI: 10.1002/jpln.201000085.

CARVALHO, M. L.; VANOLLI, B. da S.; SCHIEBELBEIN, B. E.; BORBA, D. A. de; LUZ, F. B. da; CARDOSO, G. M.; BORTOLO, L. de S.; MAROSTICA, M. E. M.; SOUZA, V. S. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. 126 p. Organização de Maurício Roberto Cherubin. DOI: 10.11606/9786589722151.

CASTRO, C. de; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; OLIVEIRA, F. A. de; FIRMANO, R. F.; ZANCANARO, L.; KLEPKER, D.; FOLONI, J. S. S.; BRIGHENTI, A. M.; BENITES, V. de M. **Magnésio: manejo para o equilíbrio nutricional da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. 54 p. (Embrapa Soja. Documentos, 430).

CASTRO, C. de; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; OLIVEIRA, F. A. de; JORDÃO, L. T. Adubação da soja: o ocaso do potássio. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 32., 2011, São Pedro. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2011. p. 307-309.

CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de. Nutrição e adubação do girassol. In: LEITE, R. M. V. B. de C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. de (ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p. 317-373.

CFSEMG - COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. 359 p.

COMEXSTAT. **Sistema oficial para extração das estatísticas do comércio exterior brasileiro de bens: ComexVis**. 2024. Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/comex-vis>. Acesso em: 12 abr. 2024.

CONAB. **Série histórica das safras: soja**. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/911-soja>. Acesso em: 22 mar. 2024.

COTRIM, G. dos S.; SILVA, D. M. da; GRAÇA, J. P. da; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ZOCCOLO, G. J.; LANNES, L. S.; HOFFMANN-CAMPO, C. B. *Glycine max* (L.) Merr. (soybean) metabolome responses to potassium availability. **Phytochemistry**, v. 205, 113472, 2023. 16 p.

DAS, D.; SAHOO, J.; RAZA, M.B.; BARMAN, M.; DAS, R. Ongoing soil potassium depletion under intensive cropping in India and probable mitigation strategies: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, article 4, 2022. DOI: 10.1007/s13593-021-00728-6.

DATNOFF, L. E. Influence of mineral nutrition of rice on disease development. In: TENG, P. S.; HEONG, K. L.; MOODY, K. (ed.). **Rice pest and disease management**. Manila: International Rice Research Institute, 1994. p. 90-100.

DUARTE, P. A.; ABREU, M. F.; FRANCISCO, E. A. B.; CITTI, D. G.; BARTH, G.; KAPPES, C. Reference values of grain nutrient content and removal for corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180102, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbcS20180102.

ECHER, F. R.; PERES, V. J. S.; ROSOLEM, C. A. Potassium application to the cover crop prior to cotton planting as a fertilization strategy in sandy soils. **Scientific Reports**, v. 10, 20404, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-77354-x

EL-MESBAHI, M. N.; AZCÓN, R.; RUIZ-LOZANO, J. M.; AROCA, R. Plant potassium content modifies the effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on root hydraulic properties in maize plants. **Mycorrhiza**, v. 22, p. 555-564, 2012. DOI: 10.1007/s00572-012-0433-3.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2. ed. Sunderland: Sinauer, 2006. 400 p.

ESTADOS UNIDOS. Geological Survey. **Mineral commodity summaries 2024**. Reston: USGS, 2024. 212 p. DOI: 10.3133/mcs2024.

EVANGELOU, V. P.; PHILLIPS, R. E. Cation exchange in soils. In: TABATABAI, A.; SPARKS, D. (ed.). **Chemical processes in soils**. Madison: Soil Science Society of America, 2005. p. 343-410. (SSSA. Book Series, 8).

FAGERIA, N. K. Nutrição e adubação potássica no arroz no Brasil. In: YAMADA, T. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato: Instituto Internacional da Potassa, 1982. 555 p.

FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; LAMAS, F. M.; SOFIATTI, V. **Acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura no Sistema Plantio Direto com rotação soja-algodão**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2022. 26 p. (Embrapa Algodão. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 111).

FIRMANO, R. F.; MELO, V. de F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Soybean and soil potassium pools responses to long-term potassium fertilization and deprivation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, p. 1819-1829, 2019a. DOI: 10.2136/sssaj2019.05.0142.

FIRMANO, R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Potassium management over 60 crops: a long-term study on an Oxisol under no-till. **Agronomy Journal**, v. 113, p. 478-489, 2020. DOI:10.1002/agj2.20456.

FIRMANO, R. F.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; ALLEONI, L. R. F. Potassium rates on the cationic balance of an Oxisol and soybean nutritional status after 8 years of K deprivation. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 293-311, 2019b. DOI:10.1017/S0014479719000371.

FONTES, P. C. R. de. **Nutrição Mineral de Plantas**: avaliação e diagnose. Viçosa: UFV, 2011. 296 p.

FRANÇA NETO, J. de B.; HENNING, A. A.; COSTA, N. P.; SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. Efeito do potássio sobre a qualidade de semente de soja. **Informativo Abrates**, v. 1, p. 44, 1991.

FRANÇA NETO, J. de B.; COSTA, N. P. da; HENNING, A. A.; PALHANO, J. B.; SFREDO, G. J.; BORKERT, C. M. Efeito de doses e métodos de aplicação de cloreto de potássio sobre a qualidade de semente de soja - resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SEMENTES, 4., 1985, Brasília. **Resumos dos trabalhos técnicos...** Brasília: ABRATES, 1985. p. 62.

FREITAS, J. R. B.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; BICALHO, E. S.; SILVA JÚNIOR, J. F.; SIQUEIRA, D. S.; BARBOSA, F. F.; SOARES, P. L. M.; PEREIRA, G. T. Soil factors influencing nematode spatial variability in soybean. **Agronomy Journal**, v. 109, n. 2, p. 610-619, 2017. DOI: 10.2134/agronj2016.03.0160.

GAIND, N.; ELSE, H. Global research community condemns Russian invasion of Ukraine. **Nature**, v. 603, p. 209-210, 2022. DOI: 10.1038/d41586-022-00601-w.

GAO, X.; ZHANG, S.; ZHAO, X.; WU, Q. Potassium-induced plant resistance against soybean cyst nematode via root exudation of phenolic acids and plant pathogen-related genes. **PLoS ONE**, v. 13, n. 7, e0200903, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0200903.

HAEDER, H. E.; BERINGER, H. Influence of potassium nutrition and water stress on the content of abscisic acid in grains and flag leaves of wheat during grain development. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 32, p. 552-556, 1981. DOI: 10.1002/jfsa.2740320605.

HAFSI, C.; DEBEZ, A.; ABDELLY, C. Potassium deficiency in plants: effects and signaling cascades. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, p. 1055-1070, 2014. DOI: 10.1007/s11738-014-1491-2.

HÄMEEN-ANTTILA, J. **The Last Pagans of Iraq**: Ibn Wahshiyya and his Nabatean Agriculture. Boston: Brill Leiden, 2006. 395 p.

HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**: an introduction to nutrient management. 7th ed. Upper Saddle River: Pearson; New Jersey: Prentice Hall, 2017. 515 p.

HOFMEISTER, F. Zur Lehre von der Wirkung der Salze. **Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie**, v. 24, n. 4-5, p. 247-260, 1888. DOI: 10.1007/bf01918191.

HUBER, D. M. Introduction. In: ENGELHARD, A.W. (ed.). **Soilborne plant pathogens**: management of diseases with macro-and microelements. St. Paul: APS Press, 1989. p. 1-8.

HUBER, D. M. The role of mineral nutrition in defense. In: HORSFALL, J. G.; COWLING, E. C. (ed.). **Plant pathology**: an advanced treatise. New York: Academic Press, 1980. v. 5, p. 381-406.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Fixação biológica de nitrogênio. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYŻANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. p. 185-196. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

HYLANDER, L. D.; AE, N.; HATTA, T.; SUGIYAMA, M. Exploitation of K near roots of cotton, maize, upland rice, and soybean grown in an Ultisol. **Plant and Soil**, v. 208, p. 33-41, 1999. DOI: 10.1023/A:1004449402800.

JAKOBSEN, S.T. Nutritional disorders between potassium, magnesium, calcium, and phosphorus in soil. **Plant and Soil**, v. 154, p. 21-28, 1993. DOI: 10.1007/BF00011066.

KAMINSKI, J.; MOTERLE, D. F.; RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. Potassium availability in a Hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 783-791, 2010. DOI: 10.1590/S0100-06832010000300020.

KIRALY, Z. Plant disease resistance as influenced by biochemical effects of nutrients and fertilizers. In: FERTILIZER USE AND PLANT HEALTH COLLOQUIUM, 12., 1976, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: International Potash Institute, 1976. p. 33-46.

KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the "ideal" soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 2, p. 259-265, 2007. DOI: 10.2136/sssaj2006.0186.

KURIHARA, C. H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. 2004. 100 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LÄUCHI, A.; PFLÜGER, R. Potassium transport through plant cell membranes and metabolic role of potassium in plants. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 11., 1978, Bern. **Potassium research review and trends: proceedings**. Bern: International Potash Institute, 1978. p. 11-163.

LEVI, A.; PATERSON, A. H.; CAKMAK, I.; SARANGA, Y. Metabolite and mineral analyses of cotton near-isogenic lines introgressed with QTLs for productivity and drought-related traits. **Physiologia Plantarum**, v. 141, p. 265-275, 2011. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2010.01438.x.

LI, H.; BURTON, J. W. Selecting increased seed density to increase indirectly soybean seed protein concentration. **Crop Science**, v. 42, p. 393-398, 2002. DOI: 10.2135/cropsci2002.3930.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley, 1979. 449 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MANUAL de adubação e calagem para o estado do Paraná. Curitiba: SBSC/NEPAR, 2019. 482 p.

MANUAL de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre: SBSC/NRS Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC, 2016. 376 p.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. London: Elsevier, 2012. 651 p.

MARTINS, R.; MELO, V. F.; SERRAT, B. M. Reserva mineral de potássio em solos dos Campos Gerais, estado do Paraná. **Ceres**, v. 51, p. 521-533, 2004.

MASCARENHAS, H. A. A.; BULISANI, E. A.; MIRANDA, M. A. C.; BRAGA, N. R.; PEREIRA, J. C. V. N. A. Deficiência de potássio em soja no Estado de São Paulo: melhor entendimento do problema e possíveis soluções. **O Agrônômico**, v. 40, p. 34-43, 1988.

MASCARENHAS, H. A. A.; MIRANDA, M. A. C.; LELIS, L. G. L.; BULISANI, E. A.; BRAGA, N. R.; PEREIRA, J. C. V. N. A. **Haste verde e retenção foliar em soja causada por deficiência de potássio**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 15 p. (Boletim Técnico, 199).

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; BRAGA, N. R.; MIRANDA, M. A. C. Potassium for soybeans. **Better Crops**, v. 88, n. 3, p. 26-27, 2004.

MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; CARMELLO, Q. A. C.; GALLO, P. B.; AMBROSANO, G. M. B. Calcário e potássio para a cultura da soja. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 445-449, 2000.

MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; QUAGGIO, J. A. Potássio. In: CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JUNIOR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. van (org.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: IAC, 2022. p. 106-112. (IAC. Boletim técnico, 100).

MEI, L.; TAO, H.; HE, C.; XIN, X.; LIAO, L.; WU, L.; LV, G. Cd²⁺ exchange for Na⁺ and K⁺ in the interlayer of montmorillonite: experiment and molecular simulation. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, 925268, 2015. 8 p. DOI: 10.1155/2015/925268.

MELO, V. F.; CORRÊA, G. F.; MASCHIO, P. A.; RIBEIRO, A. N.; LIMA, V. C. Importância das espécies minerais no potássio total da fração argila de solos do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 807-819, 2003. DOI: 10.1590/S0100-06832003000500005.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PARIZ, C. M.; YANO, E. H.; PEREIRA, F. C. B. L. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 183-193, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150666.

MENGEL, K. Potassium movement within plants and its importance in assimilate transport. In: MUNSON, R. D. (ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1985. p. 397-411. DOI: 10.2134/1985.potassium.c16.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4th ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MIKKELSEN, R. L.; ROBERTS, T. L. Inputs: potassium sources for agricultural systems. In: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (ed.). **Improving potassium recommendations for agricultural crops**. Cham: Springer, 2021. p. 47-73. DOI: 10.1007/978-3-030-59197-7_2.

MOTERLE, D. F.; BORTOLUZZI, E. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; CANER, L. Does Ferralsol clay mineralogy maintain potassium long-term supply to plants? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180166, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbc20180166.

MOTTA, M. B. (org.). **Avaliação do potencial de potássio no Brasil: área Bacia do Amazonas, setor centro-oeste, estados do Amazonas e Pará**. Manaus: CPRM, 2020. 106 p. (Informe de Recursos Minerais, Série Insumos Minerais para Agricultura, 23).

MUNIZ, A. S. **Disponibilidade de fósforo avaliada por extratores químicos e pelo crescimento de soja (*Glycine max* L. Merrill) em amostras de solos com diferentes valores de fator capacidade**. 1982. 79 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MUNSON, R. D. (ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1985. 1223 p. DOI: 10.2134/1985.potassium.

NKEBIWE, P. M.; WEINMANN, M.; BAR-TAL, A.; MULLER, T. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 196, p. 389-401, 2016. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.07.018.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. de. Soja. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. v. 3, p. 411-467.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; JORDÃO, L. T. Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes. **Informações Agronômicas**, n. 143, p. 1, 3-10, 2013.

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA, F. A. de; KLEPKER, D. Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. cap. 7, p. 133-184. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17).

OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CASTRO, C. de; PEREIRA, L. R.; DOMINGOS, C. da S. **Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja**. Paçandu: Fortgreen; Londrina: Embrapa Soja, 2016. 1 cartaz, color., 70 cm x 100 cm.

OLIVEIRA, F. A. de; BORKERT, C. M.; CASTRO, C. de; SFREDO, G. J. Resposta da soja à aplicação de potássio em solos de baixa CTC. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZA, 10; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 8; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 5., 2004, Lages. **Fertbio 2004**. Lages: SBCS, 2004. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, F. A. de; CASTRO, C. de; FRANCHINI, J. C.; TORRES, E. Manejo do solo. In: LEITE, R. M. V. B. de C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. de (ed.). **Girassol no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2005. p. 299-316.

OLIVEIRA, F. A. de; CASTRO, C. de; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; KLEPKER, D.; FIRMANO, R. F. **Tecnologias de manejo da fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2023. 75 p. (Embrapa Soja. Documentos, 458).

OLIVEIRA, L. A. M. de. Potássio. In: BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Sumário mineral 2017**. Brasília: ANM, 2019. p. 144-146. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 12 jun. 2024.

OLIVEIRA, S. A. Análise foliar. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 245-256.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, v. 117, n. 2, p. 239-242, 1992. DOI: 10.21273/JASHS.117.2.239.

PARVEEN, D.; ANWAR-UL-HAQ, M.; AZIZ, T.; AZIZ, O.; MAQSOOD, L. Potassium induces carbohydrates accumulation by enhancing morphophysiological and biochemical attributes in soybean under salinity. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, n. 7, p. 946-959, 2021. DOI: 10.1080/03650340.2020.1769075

PARVEJ, M. R.; SLATON, N. A.; PURCELL, L. C.; ROBERTS, T. L. Potassium fertility effects yield components and seed potassium concentration of determinate and indeterminate soybean. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 943-950, 2015. DOI:10.2134/agronj14.0464.

PARVEJ, M. R.; SLATON, N. A.; ROBERTS, T. L.; PURCELL, L. C. Postseason diagnosis of potassium deficiency in soybean using seed potassium concentration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 1231-1243, 2016. DOI:10.2136/sssaj2016.02.0030.

PERRENOUD, S. **Potassium and plant health**. Bern: International Potash Institute, 1977. 118 p. (Research Topics, 3).

PINZARI, F.; CUADROS, J.; JUNGBLUT, A. D.; NAJORKA, J.; HUMPHREYS-WILLIAMS, E. Fungal strategies of potassium extraction from silicates of different resistance as manifested in differential weathering and gene expression: **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 316, p. 168-200, 2022. DOI: 10.1016/j.gca.2021.10.010.

PORTER, R. **The greatest benefit to mankind**: a medical history of humanity from antiquity to the present. London: Fontana Press, 1999. 765 p.

PRASAD, R.; POWER, J. F. **Soil fertility management for sustainable agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1997. 384 p.

PUTT, E. D. Early history of sunflower In: SCHNEITER, A. A. (ed.). **Sunflower science and technology**. Madison: American Society of Agronomy, 1997. p. 1-19.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, [2000]. 111 p.

RAJÃO, R.; MANZOLLI, B.; SOARES-FILHO, B.; GALÉRY, R. **A crise dos fertilizantes no Brasil**: da tragédia anunciada às falsas soluções. Belo Horizonte: UFMG, 2022. 22 p.

REIS JUNIOR, R. dos A.; MONNERAT, P. H. DRIS norms validation for sugarcane crop. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 3, p. 379-385, 2003.

RESENDE, A. V. de; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; FONTOURA, S. M. V.; BORIN, A. L. D. C.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; CARVALHO, M. da C. S.; KAPPES, C. Balanço de nutrientes e manejo da adubação em solos de fertilidade construída. In: SEVERIANO, E. da C.; MORAIS, M. F. de; PAULA, A. M. de (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 10. p. 342-398.

RESENDE, A. V. de; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; SANTOS, F. C. dos; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, n. 156, p. 1-19, 2016.

RESENDE, A. V. de; GIEHL, J.; SIMÃO, E. de P.; ABREU, S. C.; FERREIRA, A. C. de B.; BORIN, A. L. D. C.; MARRIEL, I. E.; MELO, I. G.; MARQUES, L. de S.; GONTIJO NETO, M. M. **Créditos de nutrientes e matéria orgânica no solo pela inserção do capim-braquiária em sistemas de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 29 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 277).

RICH, C. I. Mineralogy of soil potassium. In: KILMER, V. J.; YOUNTS, S. E.; BRADY, N. C. (ed.). **The role of potassium in agriculture**. Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1968. p. 79-108. DOI: 10.2134/1968.roleofpotassium.c5.

RÖMHELD, V. Efeitos do potássio nos processos da rizosfera e na resistência das plantas às doenças. In: SIMPÓSIO SOBRE POTÁSSIO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2., 2005, São Pedro. **Potássio na agricultura brasileira: anais**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 301-319.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; MAIA, L. C.; NAKAGAWA, J. Respostas de soja ao magnésio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 47-54, 1992.

ROSOLEM, C. A.; STEINER, F. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 68, p. 658-666, 2017. DOI: 10.1111/ejss.12460 .

SALLAM, A.; SCOTT, H. D.; BREWER, D. W.; SOJKA, R. E. Characterization of potassium uptake and translocation in soybeans. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 1226-1231, 1985.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 355 p.

SCHROEDER, J. I.; FANG, H. H. Inward-rectifying K⁺ channels in guard cells provide a mechanism for low-affinity K⁺ uptake. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 88, p. 11583-11587, 1991. DOI: 10.1073/pnas.88.24.11583.

SHENG, X. F.; HE, L. Y. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 1, p. 66-72, 2006. DOI: 10.1139/w05-117.

SINGH, S. K.; REDDY, V. R. Potassium starvation limits soybean growth more than the photosynthetic processes across CO₂ levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 8, 991, 2017. DOI: 10.3389/fpls.2017.00991.

SMITH, A. The story of rising fertilizers prices. **Agricultural and Resources Economics**. ARE update, v. 25, p. 1-4, 2022. Disponível em: <https://giannini.ucop.edu/filer/file/1645718420/20317/>. Acesso em: 20 ago. 2024.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA JUNIOR, A. A. de; MUMBACH, G. L.; ALMEIDA, E.; GRANDO, D. L.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; ERNANI, P. R. Potassium buffering capacity and corrective potassium fertilizer recommendations in soils from Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0220010, 2022. DOI: 10.36783/18069657rbcS20220010.

SPARKS, D. L. Potassium dynamics in soils. In: STEWART, B. A. (ed.) **Advances in Soil Science**. v. 6. New York: Springer, 1987. 63 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-4682-4_1.

SU, H.; GOLLDACK, D.; KATSUHARA, M.; ZHAO, C.; BOHNERT, H. J. Expression and stress-dependent induction of potassium channel transcripts in the common ice plant. **Plant Physiology**, v. 125, n. 2, p. 604-614, 2001. DOI: 10.1104/pp.125.2.604.

SUGIMOTO, T.; WATANABE, K.; FURIKI, M.; WALKER, D. R.; YOSHIDA, S.; AINO, M.; KANTO, T.; IRIE, K. The effect of potassium nitrate on the reduction of *Phytophthora* stem rot disease of soybeans, the growth rate and zoospore release of *Phytophthora sojae*. **Journal of Phytopathology**, v. 157, p. 379-389, 2009. DOI: 10.1111/j.1439-0434.2008.01500.x.

TALBOTT, L. D.; ZEIGER, E. Central roles for potassium and sucrose in guard-cell osmoregulation. **Plant Physiology**, v. 111, n. 4, p. 1051-1057, 1996. DOI: 10.1104/pp.111.4.1051.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TEOTIA, P.; KUMAR, V.; KUMAR, M.; PRASAD, R.; SHARMA, S. Probiotic microbiome: potassium solubilization and plant productivity. In: KUMAR, V.; KUMAR, M.; SHARMA, S.; PRASAD, R. (ed.). **Probiotics in Agroecosystem**. Singapore: Springer, 2017. p. 451-467. DOI: 10.1007/978-981-10-4059-7_24.

THE BIZARRE: Notes and Queries: A Monthly Magazine of History, Folk-Lore, Mathematics, Mysticism, Art, Science, Etc. Manchester: S. C. and L. M. Gould, v. 5, n. 10, p. 165-180, October, 1888. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=0qYXAQAAMAAJ&hl=pt-BR&source=gbs_navlinks_s. Acesso em: 02 jul. 2021.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. de; SILVA, J. E. da. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. p. 169-183.

VYN, T. J.; YIN, X.; BRUULSEMA, T. W.; JACKSON, C. J.; RAJCAN, I.; BROUDER, S. M. Potassium fertilization effects on isoflavone concentrations in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 12, p. 3501-3506, 2002. DOI: 10.1021/jf0200671.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; FONSECA, S.; BARROS, N. F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e chance matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 685-692, 1998.

WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Advances in Soil Science**, v. 6, p. 149-188, 1987. DOI: 10.1007/978-1-4612-4682-4_4.

WANG, Y.; WU, W. H. Regulation of potassium transport and signaling in plants. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 39, p. 123-128, 2017. DOI: 10.1016/j.pbi.2017.06.006.

WENDLING, M.; BUCHI, L.; AMOSSÉ, C.; SINAJ, S.; WALTER, A.; CHARLES, R. Influence of root and leaf traits on the uptake of nutrients in cover crops. **Plant and Soil**, v. 409, p. 419-434, 2016. DOI:10.1007/s11104-016-2974-2.

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FERREIRA, A. S.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; COELHO, A. E.; SILVA, M. A. de A. e. Liberação de cálcio, magnésio e enxofre da palha de pastagem de braquiária para a soja em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 20, n. 1, p. 41-52, 2021. DOI: 10.5965/223811712012021041.

WERNER, F.; FERREIRA, A. S.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. de; FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SILVA, M. A. de A. e. Nitrogen, phosphorus, and potassium released by decomposition of palisade grass to soybean in succession. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, e01853, 2020. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01853.

WHITE, P. J.; BELL, M. J.; DJALOVIC, I.; HINSINGER, P.; RENGEL, Z. Potassium use efficiency of plants. In: MURRELL, T. S.; MIKKELSEN, R. L.; SULEWSKI, G.; NORTON, R.; THOMPSON, M. L. (ed.). **Improving potassium recommendations for agricultural crops**. Cham: Springer, 2021. p. 119-145. DOI: 10.1007/978-3-030-59197-7_5.

WHITE, P. J.; GREENWOOD, D. J. Properties and management of cationic elements for crop growth. In: GREGORY, P.; NORTCLIFF, S. (ed.). **Soil conditions and plant growth**. 12th ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2013. p. 160-194.

WYN-JONES, R. G.; POLLARD, A. Proteins, enzymes and inorganic ions. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (ed.). **Encyclopaedia of Plant Physiology**. New York: Springer, 1983. v. 15. p. 528- 562.

ZANCANARO, L. Nutrição e adubação. In: FUNDAÇÃO MT. **Boletim técnico de soja 2004**. Rondonópolis, 2004. p. 178-216 (Fundação MT. Boletim, 8).

ZANCANARO, L.; ONO, F. B.; KAPPES, C.; SEMLER, T. D.; VALENDORFF, J. D. P.; CORADINI, D.; VIDOTTI, M. V.; BERGAMIN, A. C.; BERTOL, F. D.; LESSA, J. H. L. Manejo do solo, adubação e nutrição na cultura da soja. In: KAPPES, C. (ed.). **Boletim de pesquisa 2022/2023**. Rondonópolis: Fundação MT, 2022. p. 48-75. (Fundação MT. Boletim de pesquisa, 20).

ZHOU, L. L.; CAO, J.; ZHANG, F. S.; LI, L. Rhizosphere acidification of faba bean, soybean and maize. **Science of The Total Environment**, v. 407, n. 14, p. 4356-4362, 2009. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.02.006.