

MINERAIS NO SOLO E NOS ALIMENTOS: ORIGEM, DISPONIBILIDADE E TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO

 <https://doi.org/10.63330/aurumpub.031-007>

Cintia Stefhany Ripke Ferreira

Doutoranda em Química
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: cintiastephany@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1055-6558>

Isadora Sanches Scuisato

Graduanda em Engenharia de Alimentos
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: Isa.scuisato@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1184-7286>

Maria Fernanda Miriani Vignoto

Mestre em Biociências e Fisiopatologia
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: mariafmvignoto@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-8699-5456>

Carla Micaela Ripke Ferreira

Bacharel em Agronomia
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: carlripke@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6606-0116>

Flávia Teixeira Keller

Doutora em Ciência de Alimentos
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: teixeiraflavia19@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9615-827X>

Augusto César Ferreira Monteiro

Mestrando em Química
Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná
E-mail: Augusto.cesarfm4@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9216-6726>

Fernanda Medeiros

Mestranda em Química
Universidade Estadual de Maringá, Maringá-Paraná
E-mail: fer.medeiros@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009000295761859>

Bruno Henrique Figueiredo Saqueti

Doutor em Ciência de Alimentos

Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná

E-mail: bruno_saqueti@outlook.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1118-4605>

Marina Melliny Guimarães de Freitas

Doutoranda em Ciência de Alimentos

Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná

E-mail: marinamav3@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2225-8913>

Oscar Oliveira Santos

Doutor em Química

Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná

E-mail: oosjunior@uem.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9631-8480>

RESUMO

Os nutrientes minerais são substâncias inorgânicas indispensáveis para o crescimento, desenvolvimento e manutenção das plantas e dos seres humanos. No sistema solo-planta, o solo constitui a principal fonte desses elementos, que são absorvidos pelas raízes e incorporados aos tecidos vegetais, os quais após se tornam alimento para animais e seres humanos. Diante a este cenário, este capítulo discute e revisa tópicos relevantes do teor mineral, de modo que, os minerais se classificam em macronutrientes, exigidos em grandes quantidades, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre fundamentais para o crescimento das plantas. Já os micronutrientes, como ferro, zinco, manganês e cobre, são necessários em quantidades menores, mas também são essenciais por atuarem nos processos metabólicos e no equilíbrio nutricional vegetal. No entanto, a disponibilidade desses nutrientes depende de fatores como matéria orgânica, pH, umidade, textura, atividade microbiana, e, outros. Além disso, a nutrição mineral adequada das plantas influencia diretamente a composição dos alimentos e, consequentemente, a saúde humana. Nesse contexto, técnicas analíticas são essenciais para a determinação e monitoramento dos minerais no sistema solo-planta-alimento, contribuindo para o manejo sustentável e a qualidade nutricional.

Palavras-chave: Plantas; Nutrientes; Técnicas Analíticas.

1 INTRODUÇÃO

Os nutrientes minerais são compostos inorgânicos, essenciais para o crescimento, desenvolvimento e manutenção das plantas e dos seres humanos. Na natureza, participam de ciclos biogeoquímicos sendo continuamente reutilizados na cadeia alimentar dos seres vivos (Farias; Silva; Andrade, 2022). É o solo que irá fornecer os nutrientes às plantas, que vão servir posteriormente de alimento para animais e para os seres

humanos, passando a integrar os processos de crescimento e desenvolvimento de todos os organismos vivos (Farias; Silva; Andrade, 2022).

Pode-se dizer que, nas plantas, são classificados como nutrientes benéficos e essenciais. Os nutrientes reconhecidos como benéficos são frequentemente encontrados nos tecidos vegetais embora não sejam indispensáveis para o ciclo de vida da maioria das plantas, podem promover melhorias em seu crescimento e desenvolvimento (Taiz; Zeiger, 2017; batista et al., 2018). Além destes, existem outros elementos presentes nos tecidos vegetais sendo definido como um nutriente essencial, ou seja, constitui-se de um componente intrínseco da estrutura ou do metabolismo da planta, ou cuja ausência provoca anomalias severas no crescimento, desenvolvimento e reprodução do vegetal.

Segundo Taiz; Zeiger (2017) os elementos essenciais minerais podem ser definidos como macro e micronutrientes, de acordo com sua concentração presente no tecido vegetal. Macronutrientes são nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, requeridos em grandes quantidades. Esses nutrientes, como o nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, desempenham papéis fundamentais em várias funções biológicas das plantas. Já os micronutrientes essenciais são exigidos em quantidades significativamente inferiores, como por exemplo, o ferro, zinco, manganês, cobre e outros, exercendo papel fundamental nos processos metabólicos e na manutenção da saúde vegetal, onde participam de reações enzimáticas, do equilíbrio nutricional e da síntese de compostos indispensáveis ao desenvolvimento das plantas (Senila, 2024).

Nessa linha de pensamento, Sultanbawa; Sultanbawa (2023) descrevem que o solo atua como o principal meio natural de fornecimento de minerais para as plantas, dos quais dentre os dezessete nutrientes definidos e reconhecidos como essenciais ao crescimento vegetal, quatorze deles são obtidos através do solo, sendo eles, o nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio, ferro, zinco, cobre, manganês, enxofre, cloro, boro, molibdênio e níquel. Tais nutrientes, através de mecanismos biológicos como as raízes, são absorvidos pelas plantas, que por sua vez enriquecem os alimentos de origem vegetal.

Uma vez absorvidos pelos tecidos vegetais, esses minerais tornam-se disponíveis ao consumo alimentar e, quando presentes de forma equilibrada na dieta passam a desempenhar funções relevantes no metabolismo humano, atuando na regulação e manutenção da atividade celular, no transporte de diversas substâncias, na manutenção da atividade muscular e nervosa, na facilitação da transferência de compostos através das membranas celulares e na composição dos tecidos orgânicos, estando também envolvidos de forma indireta em diversos processos metabólicos (Grillo et al., 2020).

No entanto, a composição mineral das plantas pode ser influenciada por inúmeros fatores incluindo a variabilidade genética entre as espécies vegetais, o ambiente de cultivo, as práticas de manejo, o teor de

matéria orgânica, condições como pH, umidade do solo, aeração, além da diversidade microbiana do solo, entre outros (Sultanbawa; Sultanbawa, 2023).

Nesse contexto, se torna fundamental a determinação quantitativa dos compostos minerais ao longo do sistema solo, planta e produto alimentício visando proporcionar uma análise minuciosa do teor e adequações necessárias dos minerais. Atualmente existem diferentes técnicas analíticas disponíveis, como a Espectrofotometria de Absorção Atômica (AAS), Espectrometria de Absorção Atômica em Chama (FAAS), Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES) e a Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP MS), entre outras técnicas focadas na precisão, abrangência e automação (HE et al., 2024).

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.1 MINERAIS NO SOLO

O solo é o principal meio para o desenvolvimento das plantas, atuando como suporte físico, fonte de nutrientes e reservatório de água. Sua formação resulta das ações do intemperismo físico, químico e/ou biológico nas rochas e nos materiais orgânicos. Simultaneamente, sua formação é influenciada por diversos fatores, como o material de origem, o clima, a atividade biológica, da vegetação e do relevo, além do tempo de atuação desses processos. A interação entre esses fatores é responsável pela formação e pela evolução do solo ao longo dos anos, determinando suas propriedades que influenciam diretamente sua fertilidade, estrutura e capacidade de sustentar o crescimento das plantas (Batista et al., 2018; Cordovil et al., 2025).

O solo é um sistema trifásico heterogêneo constituído pelas fases sólida, líquida e gasosa, que coexistem e interagem dinamicamente, sendo fundamentais para a disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio às plantas. Na maior parte dos solos, a fase sólida é predominantemente formada por minerais, que representam geralmente 45% ou mais da composição, enquanto a matéria orgânica corresponde a uma fração menor, normalmente em torno de até 5%. Já as fases líquida e gasosa ocupam os poros do solo, que podem representar aproximadamente 50% do seu volume total (Leite; Zeimath; Herrmann, 2005; Xavier, 2018).

Nesse contexto, o conhecimento da composição do solo é fundamental, em especial, a da fase líquida, comumente denominada solução do solo, pois constitui-se pela água presente nos poros do solo em que se encontram dissolvidos os elementos minerais disponíveis às plantas. É por meio desta que as plantas absorvem através de suas raízes água e, juntamente com ela, os nutrientes essenciais e benéficos indispensáveis para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Souza et al., 2013).

A caracterização química de um solo evidencia a presença de inúmeros elementos, e, de forma semelhante, a ocorrência dos mesmos na composição dos tecidos vegetais. Todo constituinte que esteja em forma disponível pode ser absorvido pelas plantas; entretanto, apenas a presença no tecido vegetal não

indica que seja indispensável à sua nutrição. Logo, torna-se necessário distinguir os elementos essenciais ao crescimento e desenvolvimento vegetal daqueles que, embora não sejam essenciais, podem exercer efeitos benéficos às plantas (Mendes, 2007).

Os critérios de Arnon; Stout (1939) definem a essencialidade de um nutriente com base na incapacidade da planta em completar seu ciclo vital na sua ausência, na impossibilidade de substituição desse elemento por outro para corrigir sintomas de deficiência e no seu papel metabólico direto, descartando efeitos indiretos como a melhoria das propriedades físico-químicas do solo. Sob essa ótica, quando as plantas dispõem desses elementos, juntamente com água e energia solar, são capazes de sintetizar todos os compostos necessários para seu desenvolvimento normal.

É válido ressaltar que, entre os elementos essenciais, hidrogênio, carbono e oxigênio não são classificados como nutrientes minerais, pois são obtidos principalmente da água e do dióxido de carbono, e não da fração mineral do solo. Por sua vez, os nutrientes essenciais minerais são subdivididos em macronutrientes e micronutrientes, de acordo com as quantidades em que são requeridos e absorvidos pelas plantas (Ronquim, 2020).

2.1.1 Macronutrientes

Os macronutrientes são elementos requeridos em maiores quantidades em comparação aos demais nutrientes. Entre eles destacam-se o nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), que desempenham papéis fundamentais em várias funções biológicas das plantas.

2.1.1.1 Nitrogênio

Do ponto de vista quantitativo, o nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais importantes para as culturas agrícolas, frequentemente sendo o principal fator limitante em diversos sistemas produtivos. Nas plantas, desempenha papel fundamental no metabolismo vegetal ao integrar a estrutura de compostos essenciais ao seu desenvolvimento. Entre esses metabólitos destacam-se os aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, pigmentos, lipoproteínas e vitaminas (Forghieri et al., 2026).

As formas de nitrogênio preferencialmente absorvidas pelas plantas são o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+). O contato desses íons com as raízes ocorre principalmente por meio do fluxo de massa, processo no qual os nutrientes são transportados juntamente com a água que se desloca do solo em direção ao sistema radicular (Batista et al., 2018).

A principal fonte de N está na atmosfera (N_2), forma gasosa que é quimicamente inerte e indisponível ao metabolismo vegetal, necessitando ser reduzida para que possa ser assimilada pelas plantas. A transferência do nitrogênio atmosférico para o solo ocorre por meio de mecanismos de fixação, como as

descargas elétricas. No entanto, a via mais expressiva é a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), processo mediado por microrganismos diazotróficos que convertem N_2 em formas assimiláveis pelas plantas. Estima-se que a FBN seja responsável por cerca de 92% de todo o nitrogênio fixado anualmente (Batista et al., 2018; Costa, 2023).

Outra forma de fornecimento ao sistema solo-planta pode ocorrer por meio de fertilizantes minerais, que disponibilizam o nutriente de forma imediata, bem como por fontes orgânicas, como esterco e compostos. Conforme destacado por Malavolta (2006), a eficiência do uso do nitrogênio está diretamente relacionada à escolha adequada da fonte e ao manejo sincronizado com a demanda da planta, considerando a elevada mobilidade e as transformações constantes deste nutriente no ciclo biogeoquímico.

2.1.1.2 Fósforo

O fósforo (P) faz parte da constituição de diversos compostos orgânicos, sendo essencial para a reprodução e divisão celular, desempenhando função fundamental e insubstituível no metabolismo vegetal. Atua como elemento estrutural e participa diretamente do armazenamento e da transferência de energia. Está presente na forma de ésteres fosfóricos e integra moléculas essenciais, como DNA e RNA, além de compostos energéticos como adenosina trifosfato (ATP) e adenosina difosfato (ADP). Sua atuação é indispensável em diversos processos metabólicos vitais à manutenção e ao pleno funcionamento das plantas (Anghinoni; Bissani, 2004; Sasabuchi et al., 2023).

No sistema solo, o fósforo apresenta uma dinâmica complexa e ocorre em diferentes frações, podendo estar presente tanto em formas solúveis quanto insolúveis, distribuído entre a solução do solo (forma prontamente assimilável), a fração orgânica e as formas minerais insolúveis. As formas solúveis, geralmente de natureza inorgânica, são caracterizadas pela presença de íons ortofosfato livres como PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} e $H_2PO_4^-$ que constituem as principais espécies químicas absorvidas pelas plantas e, portanto, representam as formas diretamente disponíveis na solução do solo (Sasabuchi et al., 2023; Souza et al., 2013).

A adubação fosfatada constitui uma importante ferramenta para suprir as exigências nutricionais das plantas e garantir adequado desenvolvimento e boas produtividades das culturas. Os fertilizantes fosfatados podem ser classificados em fosfatos naturais, termofosfatos, fosfatos parcialmente acidulados e fosfatos solúveis (Anghinoni; Bissani, 2004). A escolha da fonte mais adequada é fundamental e deve considerar fatores como o tipo de solo, o pH, a capacidade de adsorção de fósforo, a cultura a ser implantada e o sistema de manejo adotado.

2.1.1.3 Potássio

Nas plantas o potássio (K) está presente em quantidades similares ao nitrogênio. Nessas espécies vegetais ocorre em abundância no citoplasma e no cloroplasto, exercendo funções reguladoras essenciais, atuando como ativador de diversas enzimas. Também está ligado a diversos processos da fotossíntese e participa da formação de ATP (Meurer; Inda, 2004).

A adubação potássica consiste na aplicação de fontes ricas em potássio para suprir a alta demanda das culturas. No solo, o potássio encontra-se principalmente na forma do cátion K^+ , e sua disponibilidade é influenciada pela Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e pela mineralogia das argilas, podendo sofrer perdas por lixiviação devido à sua alta mobilidade. A principal fonte mineral utilizada é o cloreto de potássio (KCl), embora fontes como o sulfato de potássio e o nitrato de potássio também podem ser utilizadas (Otto; Vitti; Luz, 2010).

2.1.1.4 Cálcio

Presente em elevadas concentrações no solo, o cálcio (Ca) é absorvido pelas plantas na forma de íon Ca^{2+} . Esse nutriente participa da formação de compostos orgânicos, como oxalatos, citratos e tartaratos, além de exercer funções estruturais e fisiológicas fundamentais. É indispensável para a formação da lamela média da parede celular, conferindo estabilidade e integridade aos tecidos vegetais, e desempenha papel importante na absorção, no transporte e no equilíbrio de outros nutrientes no interior da planta (Anghinoni; Bissani, 2004).

O calcário constitui a principal fonte de cálcio para o sistema solo-planta, desempenhando simultaneamente a função de fertilizante e de corretivo da acidez do solo, ao elevar o pH e neutralizar o alumínio tóxico. Por meio da calagem, o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) reage com a umidade e com os íons hidrogênio presentes no solo, promovendo sua neutralização e liberando o cátion Ca^{2+} para o complexo de troca. Outra alternativa de fornecimento de cálcio é o uso do gesso agrícola ($CaSO_4$), que, além de disponibilizar Ca^{2+} , também fornece enxofre ao sistema e contribui para a melhoria das condições químicas em camadas subsuperficiais do solo (Costa et al., 2011).

2.1.1.5 Magnésio

Nas células vegetais, o magnésio (Mg) desempenha papel fundamental na ativação de diversas enzimas envolvidas em processos como respiração, fotossíntese e a incorporação do carbono. Também desempenha um papel fundamental nos mecanismos de defesa das plantas em condições de estresse abiótico (Senbayram et al., 2015). Além disso, o magnésio é componente estrutural da molécula de clorofila, o que

evidencia sua importância direta na captura de energia luminosa e na realização da fotossíntese (Castro et al., 2020; Taiz; Zeiger, 2013).

De modo geral, os solos brasileiros apresentam baixos teores de magnésio. Esse nutriente tem origem no intemperismo de rochas que contêm minerais primários, bem como alguns minerais secundários. Após ser liberado para a solução do solo, o Mg^{2+} pode seguir diferentes destinos: ser lixiviado ao longo do perfil, adsorvido ao complexo de troca de cátions, precipitado na forma de minerais, perdido por erosão ou, ainda, ser absorvido pelas plantas (Batista et al., 2018; Castro et al., 2020).

2.1.1.6 Enxofre

O enxofre (S) está presente na composição de aminoácidos sulfurados, como cistina, cisteína e metionina, além de integrar diversas coenzimas e vitaminas, entre elas a coenzima A, S-adenosilmetionina, biotina, vitamina B₁ e ácido pantotênico. Esses compostos desempenham funções essenciais no metabolismo vegetal, participando de reações bioquímicas fundamentais para o crescimento, a síntese de proteínas e o funcionamento adequado das células (Taiz; Zeiger, 2013).

A dinâmica do enxofre no solo é caracterizada por uma série de processos químicos e biológicos, incluindo reações de oxirredução, mineralização e imobilização da matéria orgânica, além da adsorção e dessorção de sulfatos nos colóides do solo, fatores que influenciam diretamente sua disponibilidade às plantas (Teixeira et al., 2017). Encontra-se predominantemente na forma orgânica, de modo que o suprimento desse nutriente às plantas está diretamente relacionado ao teor de matéria orgânica e à sua mineralização. Esse processo libera gradualmente o enxofre na forma de sulfato (SO_4^{2-}) para a solução do solo, possibilitando sua absorção pelas raízes. Contudo, a disponibilidade imediata do S é regulada pelo equilíbrio entre os processos de adsorção e dessorção do sulfato na fase sólida e sua concentração na solução do solo, conforme descrito por Anghinoni; Bissani, (2004).

2.1.2 Micronutrientes

Os micronutrientes essenciais são exigidos em quantidades significativamente inferiores, onde Taiz; Zeiger (2017) descrevem que os principais micronutrientes e suas atividades no metabolismo das plantas são o ferro (Fe), que é fundamental para a síntese de clorofila e respiração celular; manganês (Mn), que auxilia na fotossíntese e na proteção contra o estresse oxidativo; zinco (Zn), essencial para o crescimento celular e síntese de proteínas; cobre (Cu), que participa da fotossíntese e protege contra doenças; boro (B), crucial para a formação celular e transporte de açúcares; molibdênio (Mo), importante para a fixação de nitrogênio e síntese proteica; e cloro (Cl), que auxilia no equilíbrio osmótico e na fotossíntese. A deficiência ou o desequilíbrio desses micronutrientes pode prejudicar o crescimento das plantas, comprometendo a produtividade e a qualidade das culturas (Senila, 2024).

Os solos apresentam variações significativas em relação ao teor de micronutrientes, suas quantidades podem variar conforme os teores presentes nos materiais de origem. Esses micronutrientes podem integrar a estrutura interna dos minerais ou estar adsorvidos à superfície dos minerais e dos compostos orgânicos (Bohnen; Bissani, 2004; Matos et al., 2024).

As fontes de micronutrientes utilizadas na agricultura são amplamente descritas na literatura nacional e internacional e, de modo geral, classificam-se em fontes inorgânicas (como sais, ácidos, óxidos e oxissulfatos), fontes orgânicas (quelatos sintéticos e complexos orgânicos) e óxidos silicatados. A escolha da fonte e da forma de aplicação deve levar em consideração alguns pontos como o histórico da área, a análise de solo, a diagnose visual e/ou a análise foliar. Os micronutrientes podem ser fornecidos via tratamento de sementes, como a aplicação de molibdênio (Mo) e cobalto (Co) utilizados para melhorar a FBN; via solo, no sulco de semeadura ou incorporados ao solo; e via foliar, que proporciona disponibilização rápida e eficiente, desde que sejam utilizadas fontes de alta solubilidade (Vitti; Grando, 2005).

2.2 MINERAIS DO SOLO E A NUTRIÇÃO VEGETAL

Tendo em vista a composição mineral do solo, o teor nos alimentos de origem vegetal apresenta uma dependência direta com a disponibilidade dos minerais que estão presentes no solo, a capacidade da planta em absorvê-los e ainda, a translocação dos minerais para os tecidos comestíveis, como as folhas, frutos, sementes e até mesmo as raízes. Logo, pode-se dizer que solo, planta, alimentação e os humanos apresentam uma relação e, devido a essas condições, a presença de uma grande quantidade de minerais no solo, não garante que isso estará disponível para as plantas, além de garantir o bom crescimento e desenvolvimento das plantas (Sultanbawa; Sultanbawa, 2023).

Para que de fato possa ter disponibilidade de minerais, alguns fatores são imprescindíveis como, pH do solo, matéria orgânica presente, textura, entre outros. O pH tem a função de controlar a solubilidade dos minerais, a forma química em que serão encontrados e a interação com a matéria orgânica. Um pH ácido aumenta a disponibilidade de ferro, magnésio, zinco e cobre, enquanto um pH neutro ou levemente ácido é considerado ideal para a cultura e um pH alcalino desfavorece os minerais e pode ocasionar a precipitação de cálcio.

No caso da matéria orgânica, sua atuação acaba sendo como regulador da fertilidade, forma complexos com os minerais, evita a lixiviação e ainda, melhora a retenção da água, bem como, sua estrutura. Já, a textura que o solo apresenta interfere e em alguns pontos, como a retenção de água, nutrientes e a aeração do solo (Barrow; Hartemink, 2023; Jindo et al., 2023; Maluf et al., 2015).

Nas raízes do vegetal é onde acontece a absorção mineral de fato, que irá disponibilizar os minerais adequadamente, na região da planta chamada de zona pilífera, onde estão dispostos os pelos radiculares, apresentando uma maior área de contato com a solução do solo. Assim, para que os nutrientes possam ser absorvidos, precisam estar em sua forma iônica solúvel (Alaoui, 2022).

O transporte dos minerais para a superfície da raiz acontece de três formas, sendo elas: fluxo de massa, difusão e interceptação radicular. No fluxo de massa, a água é o meio de transporte para os nutrientes. Já a difusão, tem como mecanismo de transporte a migração do nutriente de uma região mais concentrada para uma menos concentrada, enquanto na interceptação radicular a raiz cresce e entra em contato direto com os nutrientes que estão presentes no solo, mas apresenta uma menor contribuição quantitativa (Alaoui, 2022).

Posteriormente a absorção dos nutrientes, acontece o processo de translocação destes minerais para que sejam distribuídos para os diferentes tecidos da planta, podendo acontecer pelo xilema e o floema. O xilema transporta os minerais para a parte aérea das plantas, com um fluxo unidirecional e os principais nutrientes transportados por ele são: cálcio, magnésio, nitrato e sulfato. Em contrapartida, o floema apresenta um fluxo bidirecional transportando os nutrientes como, fósforo, potássio, zinco, entre outros, para as demais partes da planta como frutos, sementes e órgãos reserva. A translocação determina o quanto de nutriente irá chegar às partes comestíveis dos alimentos (Dalir, 2023; Le Bot; Adamowicz; Robin, 1998).

2.3 MINERAIS NOS ALIMENTOS

Os minerais presentes nos alimentos resultam da capacidade das plantas de absorver nutrientes do solo, principalmente pelas raízes, e incorporá-los aos seus tecidos. Dessa forma, a qualidade mineral dos alimentos depende da capacidade da planta de captar e distribuir esses elementos ao longo de seu desenvolvimento (saloner; Bernstein, 2023). No entanto, a biodisponibilidade de absorção desses minerais pelo organismo humano é influenciada por inibidores presentes na matriz vegetal, como fitatos e fibras, que podem se ligar a íons como o zinco e o cálcio, limitando sua absorção intestinal (Balaji et al., 2026).

Com o objetivo de elevar a produtividade agrícola e aumentar a disponibilidade de micro e macronutrientes no solo, recorre-se ao uso de fertilizantes. Entretanto, sua aplicação inadequada pode comprometer a qualidade do solo, afetar recursos naturais e gerar impactos à saúde humana, tornando essencial o manejo nutricional equilibrado (Bana et al., 2022). Segundo o estudo de Bana *et al.* (2022), a aplicação de fertilizante foliar multielementar melhorou a qualidade nutricional em frutos de berinjela, observaram-se aumentos significativos nas concentrações de Fe (+26%), Zn (+34%), K (+6%), Cu (+24%) e Mn (+27%), minerais fundamentais para o funcionamento do organismo humano.

Esses minerais são nutrientes indispensáveis à manutenção das funções fisiológicas e devem ser obtidos obrigatoriamente por meio da alimentação, uma vez que o organismo humano não é capaz de

sintetizá-los (Guardia; Garrigues, 2015). Diferentes íons minerais desempenham funções biológicas específicas e cruciais. Por exemplo, a insuficiência de zinco, selênio e ferro pode prejudicar significativamente as respostas imunológicas e elevar a suscetibilidade a infecções (Gombart; Pierre; Maggini, 2020). Adicionalmente, o potássio e o magnésio desempenham papéis fundamentais na regulação da pressão arterial e do ritmo cardíaco, de modo que a deficiência desses elementos está associada a um maior risco de desenvolvimento de hipertensão e doenças cardiovasculares (Razzaque; Wimalawansa, 2025). Assim, a composição mineral dos alimentos é determinada por interações entre o solo, as práticas de manejo agrícola e o metabolismo vegetal, influenciando diretamente a qualidade nutricional da dieta e sua relação com a saúde humana (Morton et al., 2023).

2.4 ANÁLISE DE MINERAIS

Atualmente, um fator imprescindível é a determinação dos elementos minerais em diversos analitos. Por causa de sua ação bioquímica nos organismos vivos, teores baixos e/ou a falta de determinados metais podem ocasionar complicações, incluindo desde as plantas até o homem, bem como, uma elevada concentração pode afetar negativamente (Senila, 2024). Desta maneira, o teor de metais pode ser analisado por técnicas analíticas como a AAS, FAAS, ICP-OES, ICP-MS e muito mais (HE et al., 2024).

As técnicas espectrométricas fornecem informações sobre a composição química das substâncias através dos princípios da espectroscopia, ou seja, através da interação entre a radiação eletromagnética e a matéria (Rawat et al., 2024). Dentre essas técnicas, a AAS é uma das mais utilizadas, se baseando na absorção de comprimentos de onda de luz específicos por átomos no estado gasoso. A luz emitida é absorvida pelos analitos, que é quantificada e, assim, possibilita a identificação e quantificação dos elementos específicos. A AAS apresenta vantagens nas análises de metais e metaloides em diversas matrizes. Na FAAS a técnica também se baseia na absorção de comprimentos de onda específicos por átomos no estado gasoso, onde a forma de atomização dos átomos é realizada por uma chama (Rawat et al., 2024).

As técnicas de ICP-OES e ICP-MS oferecem alta sensibilidade, seletividade e exatidão, e são baseadas na utilização de um plasma de alta temperatura gerado a partir do gás argônio para a atomização, excitação e ionização da amostra. Enquanto que a ICP-OES quantifica a luz emitida em comprimentos de onda específicos pelos analitos, a ICP-MS foca na razão massa/carga dos íons, permitindo a determinação das concentrações elementares (Naozuka, 2025). Além disso, a ICP-MS apresenta uma vantagem a mais por conseguir identificar mais de um elemento presente na amostra, ampla faixa linear, alta exatidão, sensibilidade, seletividade e baixos limites de detecção (HE et al., 2024).

Uma etapa crucial em qualquer técnica analítica é a preparação da amostra. Caso não seja realizada de maneira correta e adequada, os resultados podem ser acompanhados de erros, tornando a análise problemática e não confiável (Assis et al., 2024). As principais etapas da preparação da amostra envolvem: coleta, armazenamento, homogeneização e digestão, porém as especificidades dependem de cada tipo de amostra, sendo elas solo, água e matrizes biológicas ou alimentícias. Uma preparação da amostra adequada é essencial para as análises, pois, fragmenta e torna a matriz solúvel, torna os metais disponíveis para análise, extrai os metais de interesse da matriz para um solvente adequado, concentra os metais que estão em baixas concentrações, elimina interferentes e reduz o efeito da matriz (Rawat et al., 2024).

3 CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou o papel dos nutrientes minerais na manutenção da fertilidade do solo, no desenvolvimento vegetal e, conseqüentemente, na qualidade nutricional dos alimentos. Pode-se concluir que a dinâmica dos macronutrientes e micronutrientes no sistema solo-planta é resultado de processos físicos, químicos e biológicos interdependentes, que determinam sua disponibilidade, absorção e utilização pelas plantas. Além disso, os mecanismos que regulam a mobilidade, transformação e interação dos minerais no solo permitem aprimorar estratégias de manejo nutricional, favorecendo maior eficiência no uso de fertilizantes e sustentabilidade dos sistemas produtivos.

De forma análoga, a nutrição mineral adequada das plantas reflete diretamente na composição mineral dos alimentos, estabelecendo uma conexão direta entre qualidade do solo, produtividade agrícola e saúde humana. Portanto, a análise dos minerais constitui ferramentas indispensáveis para o diagnóstico nutricional e para a tomada de decisões técnicas, possibilitando avaliar deficiências, excessos e desequilíbrios, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis e seguras.

Nesse contexto, o estudo integrado dos minerais no solo, na planta e nos alimentos reforça a importância de uma abordagem sistêmica, em que fertilidade, nutrição vegetal e qualidade alimentar não são temas isolados, mas partes de um processo contínuo que sustenta a produção agrícola e a segurança alimentar.

REFERÊNCIAS

- ALAOUI, I. *et al.* The Mechanisms of Absorption and Nutrients Transport in Plants: A Review. **Tropical Journal of Natural Product Research**, v. 6, n. 1, p. 8–14, 2022.
- ANGHINONI, Ibanor; BISSANI, Carlos A. Fósforo e Adubos Fosfatados. *In: Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação das Culturas*. p. 117–129, 2004.
- ARNON, D. I. & STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant physiol*, Washington, v. 14, p. 371-375, 1939.

ASSIS, Rosivan Santos; *et al.* Sample preparation strategies alternative to mineralization for elemental analysis in foods by spectro analytical techniques – A review. **Microchemical Journal**, v. 199, p. 110059, 2024.

BALAJI, Vaishnavi *et al.* Micronutrient Differences in Conventionally and Organically Produced Foods, **Nutrients**. n. 1, p. 1–17, 2026.

BANA, Ram Swaroop *et al.* Foliar nutrient supplementation with micronutrient - embedded fertilizer increases biofortification , soil biological activity and productivity of eggplant. **Scientific Reports**, n. 1, p. 1–16, 2022.

BARROW, N. J.; HARTEMINK, Alfred E. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants. **Plant and Soil**, v. 487, n. 1–2, p. 21–37, 2023.

BATISTA, Marcelo Augusto, *et al.* **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**, p. 113-162, 2018.

BOHNEN, Humberto; BISSANI, Carlos A. Micronutrientes. *In*: **Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação das Culturas**. (2. ed). Porto Alegre: Editora Metrópole, p. 221–237, 2004.

CASTRO, César de *et al.* Magnésio Manejo para o equilíbrio nutricional da soja. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 1–55, 2020.

COSTA, Alexandre Sylvio Vieira *et al.* Efeitos no solo do gesso produzido em diferentes reações químicas da solução de ácido sulfúrico reciclada com carbonato de cálcio residual e óxido de cálcio. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 17–22, 2011.

COSTA, Magna Maria Macedo Nunes. Fixação biológica de nitrogênio : uma revisão. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 1–36, 2023.

DALIR, Neda. Nutrients Uptake and Transport in Plants: An Overview. *In*: SINGH, Vijay Pratap; SIDDIQUI, Manzer H. (Orgs.). **Plant Ionomics**. 1. ed.: Wiley, p. 180–190, 2023.

FARIAS, Marília Eduarda Fernandes; SILVA, Rayssa Barbosa; ANDRADE, Yngred Maria de Souza. **Importância dos minerais nas diferentes fases da vida**, 2022.

FORGHIERI, Giulia *et al.* Enabling biological nitrogen fixation in agriculture : An eco-industrial perspective. **Food Bioscience**, v. 73, n.1, p. 1–19, 2026.

GOMBART, Adrian F.; PIERRE, Adeline; MAGGINI, Silvia. A Review of Micronutrients and the Immune System – Working in Harmony to Reduce the Risk of Infection, **Nutrients**, n. 1–41, 2020.

GUARDIA, Miguel; GARRIGUES, Salvador. Handbook of Mineral Elements in Food. **John Wiley & Sons**, 2015.

GRILLO, Andrey de Conti *et al.* Importância e atuação dos sais minerais no organismo. **Revista Científica Eletrônica de Enfermagem da FAEF**, v. 4, n. 1, p. 1–11, 2020.

HE, S. et al. Research progress of the detection and analysis methods of heavy metals in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 1, n. 1, p. 1–21, 2024.

JINDO, Keiji *et al.* Biotic and abiotic effects of soil organic matter on the phytoavailable phosphorus in soils: a review. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 29, 2023.

LE BOT, J.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. **Scientia Horticulturae**, v. 74, n. 1–2, p. 47–82, 1998.

LEITE, Fábio de Lima; ZEIMATH, Ervino C.; HERRMANN, Paulo Sergio de Paula. Análise de Minerais do Solo por Espectroscopia de Força Atômica. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, p. 1–7, 2005.

MATOS, Carlos Henrique Lima *et al.* Micronutrientes do solo : dinâmica , disponibilidade e manejo de adubação. **Seven publicaçãoe acadêmicas**, n. 1, p. 1–21, 2024.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MALUF, Henrique José Guimarães Moreira *et al.* Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690–1702, 2015.

MASSON-BOIVIN, C.; SACHS, J. L. Symbiotic nitrogen fixation by rhizobia — the roots of a success story. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 44, p. 7-15, 2018.

MENDES, Alessandra Monteiro Salviano. Introdução a fertilidade do solo. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 1–64, 2007.

MEURER, Egon J.; INDA, Alberto V. Potássio e Adubos Potássicos. *In: Fertilidade dos Solos e Manejo da Adubação das Culturas*. p. 139–151.

MORTON, Claire M. *et al.* Soil micronutrients linked to human health in India. **Scientific Reports**, n. 1, p. 1–11, 2023.

NAOZUKA, Juliana; OLIVEIRA, *et al.* Determination of essential and toxic elements by ICP-MS in herbal medicines: a comprehensive review. **ACS Omega**, v. 10, n. 43, p. 50695–50708, 2025.

OTTO, Rafael; VITTI, Godofredo Cesar; LUZ, Pedro Henrique Cerqueira. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 1, p. 1137–1145, 2010.

CORDOVIL, Hellen Patrícia Lemos, *et al.* Formação e composição mineralógica dos solos e suas relações com a fertilidade e o manejo do solo. **REVISTA OBSERVATORIO DE LA ECONOMIA LATINOAMERICANA**, v. 23, n. 7, p. 1–24, 2025.

RAWAT, Hemant; Bhat, *et al.* Emerging techniques for the trace elemental analysis of plants and food-based extracts: A comprehensive review. **Talanta Open**, v. 10, p. 100341, 2024.

RAZZAQUE, Mohammed S.; WIMALAWANSA, Sunil J. Minerals and Human Health : From Deficiency to Toxicity, **Nutrients**, p. 1–27, 2025.

RONQUIM, Carlos Cesar. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 1–36, 2020.

SALONER, Avia; BERNSTEIN, Nirit. Dynamics of Mineral Uptake and Plant Function during Development of Drug-Type Medical Cannabis Plants. **Institute of soil Water**, n. 1, p. 1–19, 2023.

SASABUCHI, Isabela T. M. *et al.* Sustentabilidade no uso de Fósforo: Uma revisão bibliográfica com foco na situação atual do estado de São Paulo, Brasil. v. 46, n. 2, p. 185–198, 2023.

SENBAYRAM, M.; GRANSEE, A.; WAHLE, V.; THIEL, H. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. **Crop and Pasture Science**, v. 66, n. 12, p. 1219-1229, 2015.

SENILA, M. Recent Advances in the Determination of Major and Trace Elements in Plants Using Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. **Molecules**, v. 29, n. 1, p. 1–20, 2024.

SOUZA, Edivan R. De *et al.* Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, n. 81, p. 510–517, 2013.

SULTANBAWA, F.; SULTANBAWA, Y. Mineral nutrient-rich plants – Do they occur ? **Applied Food Research**, v. 3, n. 2, p. 100347–100351, 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. (5. ed). Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY A. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. (6. ed.). Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, n. 1, p. 1–6, 2017.

VITTI, Godofredo Cesar; GRANDO, Nivaldo. O uso de micronutrientes na maximização da produção. **Visão Agrícola**, n. 1, p. 24–26, 2005.

XAVIER, Francisco Alisson da Silva. Solo – definição e importância. Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. **Embrapa**, p. 15–25, 2018.