

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

Cobalt dynamics in the soil-plant system and its participation in plant metabolism and nutrition: a review

Milleny Nogueira Serafim¹, Rithielly Machado Rodrigues de Araújo¹, Arielle Gonçalves Abdala¹, Bárbara Vieira dos Santos¹, Ellen Jardyelle de Carvalho da Conceição¹, Flavielli Porto da Silva¹, Ane Gabriele Vaz Souza², Flivia Fernandes de Jesus Souza¹, Valeska Cristina Souza Silva de Assis¹, Mariana Pina da Silva Berti¹⁺

¹ Universidade Estadual de Goiás

² Universidade Estadual Paulista

Resumo: O cobalto (Co) é um elemento metálico de importância crescente nos estudos de nutrição vegetal, especialmente em razão de sua atuação indireta na fixação biológica de nitrogênio (FBN) em leguminosas, pela presença na estrutura da cobalamina sintetizada por microrganismos simbióticos. Embora não seja classificado como micronutriente essencial para plantas, o Co apresenta efeitos benéficos sobre o crescimento, desenvolvimento e tolerância ao estresse em diversas espécies, o que tem motivado avanços em pesquisas agrônomicas e ambientais. Esta revisão bibliográfica reúne informações atualizadas sobre a dinâmica do Co no sistema solo-planta, abordando processos de absorção, transporte e redistribuição, bem como sua participação no metabolismo vegetal e as exigências em culturas agrícolas de relevância. Também são discutidas a marcha de absorção e os sintomas associados à deficiência, destacando implicações fisiológicas e agrônomicas. Os resultados sintetizados evidenciam que a disponibilidade adequada de Co pode influenciar diretamente o desempenho de leguminosas e indiretamente culturas não-leguminosas, sendo fundamental compreender seus níveis críticos para evitar tanto deficiências quanto toxicidade. Portanto, o manejo racional do Co em sistemas agrícolas representa um desafio atual para a nutrição de plantas e para a sustentabilidade da produção.

Palavras-chave: micronutriente; leguminosas; metabolismo vegetal; nutrição mineral; fixação biológica de nitrogênio.

Abstract: Cobalt (Co) is a metallic element of increasing relevance in plant nutrition studies, particularly due to its indirect role in biological nitrogen fixation (BNF) in legumes, through its presence in the cobalamin structure synthesized by symbiotic microorganisms. Although not classified as an essential micronutrient for plants, Co has shown beneficial effects on growth, development, and stress tolerance in different species, which has encouraged agronomic and environmental research. This literature review compiles updated information on the dynamics of Co in the soil-plant system, addressing absorption, transport, and redistribution processes, as well as its participation in plant metabolism and crop requirements. The absorption pattern and deficiency symptoms are also discussed, highlighting physiological and agronomic implications. The evidence indicates that adequate Co availability can directly influence legume performance and indirectly affect non-legume crops, making it crucial to establish critical levels to avoid both deficiency and toxicity. Thus, rational management of Co in agricultural systems represents a current challenge for plant nutrition and production sustainability.

Keywords: micronutrient; legumes; plant metabolism; mineral nutrition; biological nitrogen fixation.

Contextualização e análise

O cobalto (Co) é um elemento metálico de coloração branco-acinzentada, cujas propriedades magnéticas se assemelham às do ferro e do níquel (BARCELOUX, 1999). O Co é fundamental para

procariontes, seres humanos e outros mamíferos, desempenhando papéis essenciais em processos metabólicos, principalmente por ser constituinte da cobalamina (vitamina B₁₂) (HU et al., 2021).

Nas plantas, o Co não é micronutriente essencial, mas é considerado elemento benéfico, podendo retardar o senescimento foliar via inibição da síntese de etileno, além de conferir resistência à seca em sementes (LANGE, 2017). Além disso, o Co exerce papel indireto na fixação biológica de nitrogênio (FBN), especialmente em leguminosas, devido à sua presença na cobalamina produzida por microrganismos simbióticos (SALAM et al., 2024; JÖRGENSEN; JOERGENSEN, 2024).

O Co apresenta baixa abundância ambiental. Em solos, suas concentrações variam entre 15 e 25 ppm, enquanto em águas naturais os níveis são ainda menores, em torno de 0,04 ppm. Nas plantas, os teores típicos situam-se entre 0,1 e 10 ppm em peso seco, evidenciando que, apesar do baixo conteúdo, o elemento pode exercer efeitos significativos na fisiologia vegetal e na eficiência de processos como a FBN (HU et al., 2022; GENCHI et al., 2023).

A disponibilidade de cobalto no solo é determinada por fatores edáficos e geoquímicos, como pH, teor de matéria orgânica, capacidade de adsorção em óxidos de ferro e manganês e condições de oxirredução (MAHEY et al., 2020). Em ambientes tropicais, intensamente intemperizados e sujeitos a lixiviação, a concentração de Co biodisponível tende a ser baixa, o que pode limitar sua absorção pelas plantas e comprometer o desempenho de processos metabólicos associados (INAYAT et al. 2024).

Estudos moleculares recentes demonstram que transportadores de metais, como o OsNramp5 em arroz, são responsáveis pela absorção e acúmulo de Co nos tecidos vegetais, evidenciando mecanismos genéticos envolvidos na regulação de sua homeostase (HUANG et al., 2025).

Diante dessa complexidade, compreender a dinâmica do cobalto no sistema solo-planta é essencial para o manejo sustentável dos sistemas agrícolas (SKHAWAT et al, 2025). A presente revisão tem como objetivo discutir os principais avanços no entendimento sobre o comportamento do Co nos solos, sua absorção, translocação e funções metabólicas em plantas, bem como os riscos associados à deficiência e à toxicidade, considerando evidências recentes da literatura científica (GENCHI et al., 2023).

Dinâmica do nutriente no sistema solo planta

A disponibilidade de nutrientes, como o cobalto, no sistema solo-planta é influenciada por múltiplos fatores, sendo eles químicos, físicos e biológicos. Entre os fatores químicos, destacam-se o pH, a presença de compostos orgânicos, a capacidade de troca catiônica e a concentração de óxidos de ferro e manganês, que adsorvem e controlam a solubilidade do Co (MAHEY et al., 2020). Além disso, processos biológicos, como a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica, podem mobilizar ou imobilizar o Co,

alterando sua disponibilidade para as plantas (GENCHI et al., 2023).

No sistema solo, o Co mantém-se dividido em frações solúveis e trocáveis altamente transitório para frações residuais parcialmente não reativas (JALALI et al. 2019; LIU et al. 2019; MALINOWSKA & JANKOWSKI, 2020). Essas frações são fundamentais porque determinam a fito disponibilidade dos elementos, influenciando a absorção e, por consequência, a nutrição vegetal (PEREZ-ESPINOSA et al., 2005).

O transporte de Co do solo para as raízes ocorre principalmente na forma iônica (Co^{2+}), e sua absorção é mediada por transportadores de metais presentes na membrana radicular, como membros da família Nramp e ZIP (HUANG et al., 2025). A absorção também depende da demanda da planta e das interações com outros nutrientes, apresentando efeitos antagonistas ou sinérgicos com elementos como ferro, manganês e zinco (RADI et al., 2025).

A translocação do Co dentro da planta segue padrões relativamente limitados, sendo mais concentrado nas raízes e em menor quantidade nos caules e folhas, embora algumas espécies acumulem o elemento em órgãos reprodutivos (JÖRGENSEN; JOERGENSEN, 2024). A dinâmica interna do nutriente é, portanto, influenciada tanto pela disponibilidade no solo quanto pela capacidade fisiológica da planta de absorver, transportar e armazenar o Co, evidenciando a complexidade do manejo do micronutriente em sistemas agrícolas (KOSIOREK, M., & WYSZKOWSKI, M 2020).

Fatores ambientais, como temperatura, regime hídrico e condições de oxirredução do solo, também afetam a mobilidade e a biodisponibilidade do cobalto. Em solos tropicais úmidos, a lixiviação e a precipitação em óxidos de ferro e manganês reduzem a fração solúvel de Co, enquanto solos mais alcalinos podem apresentar menor disponibilidade devido à precipitação de carbonatos (TRAN et al 2024).

Absorção, transporte e redistribuição

A absorção de cobalto pelas plantas ocorre predominantemente na forma iônica Co^{2+} , sendo mediada por transportadores de membrana presentes nas células radiculares, como membros das famílias Nramp e ZIP, que também participam da absorção de outros metais essenciais como ferro, manganês e zinco (HUANG et al., 2025). A eficiência de absorção depende da disponibilidade do nutriente no solo, do estado de desenvolvimento da planta e de fatores ambientais, como pH, umidade e composição química do solo (MAHEY et al., 2020).

Uma vez absorvido pelas raízes, o cobalto é mobilizado principalmente pela proteína FPN1, responsável pelo carregamento de Co^{2+} no xilema e sua subsequente redistribuição sistêmica para os tecidos da parte aérea via fluxo transpiratório, mecanismo crucial para a regulação da homeostase

desse metal nos órgãos superiores (GOPAL et al., 2003; LANGE et al., 2016; POSCHENRIEDER et al., 2019).

Entretanto, a eficiência dessa mobilização não é uniforme, variando conforme espécie, genótipo e demanda fisiológica, e que transportadores específicos podem modular o acúmulo do elemento em diferentes tecidos, influenciando tanto a eficiência da fixação biológica de nitrogênio quanto a segurança alimentar em partes consumíveis, essas e demais características estão representadas na figura 1 (JÖRGENSEN; JOERGENSEN, 2024).

Além dos determinantes genéticos, fatores químicos e interações com outros nutrientes também modulam a redistribuição do Co, pela presença de ligantes orgânicos no xilema, que facilitam o movimento do metal para folhas e flores (SALAM et al., 2024). Em condições de deficiência, a planta pode priorizar a alocação do Co para órgãos essenciais à reprodução e ao metabolismo basal, enquanto em condições de excesso ocorre maior sequestro em raízes ou vacúolos, reduzindo o risco de toxicidade nos tecidos fotossintéticos (GENCHI et al., 2023).

Riesen e Feller (2005) demonstraram que o cobalto pode ser remobilizado para os grãos de trigo tanto por meio do transporte direto via xilema quanto pela redistribuição através do floema. Evidências sugerem que essa transferência ocorre em estruturas como folhas, pedúnculo ou glumas, funcionando como pontos estratégicos de regulação que determinam a quantidade de cobalto efetivamente incorporada à dieta humana.

Evidências experimentais reforçam essa limitação fisiológica, Deng et al. (2021) demonstraram que o Co possui apenas mobilidade floemática intermediária, explicando por que a planta depende majoritariamente da absorção direta via raiz para atender a demanda dos nódulos ao longo do ciclo. Além disso, o transporte do Co dentro da planta é parcialmente regulado por hormônios vegetais, como auxinas e citocininas, que modulam a mobilidade do nutriente e a expressão de genes codificadores de transportadores metálicos (HUANG et al., 2025). Esse controle hormonal é especialmente relevante em espécies leguminosas, nas quais a redistribuição eficiente do Co para nódulos influencia diretamente a atividade da nitrogenase e a FBN (RADI et al., 2025).

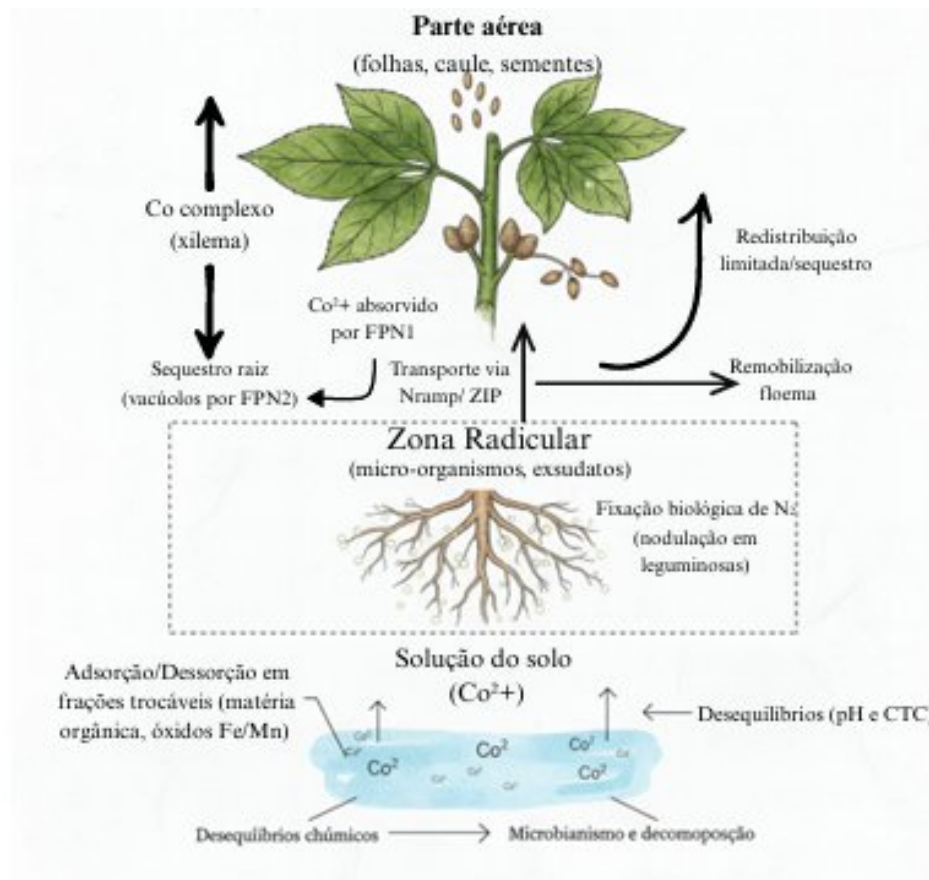


Figura 1. Dinâmica do cobalto no sistema solo-planta.

Fonte: Autoria própria.

Estudos recentes indicam que a forma química do Co no solo e a interação com moléculas orgânicas, como ácidos orgânicos exsudados pelas raízes, afetam sua absorção e posterior redistribuição nos tecidos vegetais (INAYAT et al. 2024). Esses mecanismos podem explicar a variação entre diferentes espécies e genótipos, reforçando a necessidade de estratégias de manejo que otimizem a disponibilidade do Co sem causar acúmulo tóxico em órgãos comestíveis (SKHAWAT et al. 2025). A simbiose leguminosa-rizóbio apontam que a aplicação de Co eleva a atividade da nitrogenase e o número de nódulos, indicando uma relação estreita entre a disponibilidade do micronutriente e a eficiência da fixação biológica de N (TOMÍC et al., 2024).

Participação do nutriente no metabolismo vegetal

O cobalto desempenha papel relevante na regulação de processos metabólicos, sobretudo no equilíbrio hormonal e nas respostas antioxidantes em plantas. Estudos recentes em milho mostraram que brassinosteróides associados ao Co atuam na regulação hormonal, no metabolismo celular e na defesa antioxidante, reduzindo os efeitos de sua toxicidade (SALAM et al., 2025). De modo semelhante, em rabanete sob estresse salino, a aplicação de Co com prolina aumentou a atividade de enzimas antioxidantes e melhorou a tolerância à salinidade, destacando sua função no metabolismo antioxidante (INAYAT et al., 2024).

Outro aspecto relevante é o papel do Co na absorção e utilização de nutrientes essenciais. Em milho cultivado sob diferentes regimes hídricos, a combinação de Co com quitosana favoreceu a absorção de macronutrientes, o rendimento de grãos e a eficiência no uso da água (ELSHAMLY, AMA. & NASSAR, SMA. 2023). Já em soja, o enriquecimento de sementes com Co e molibdênio se mostrou eficaz para estimular o metabolismo inicial, proporcionando melhor vigor e desenvolvimento das plântulas (ABREU-JUNIOR et al., 2023).

Além de interagir com nutrientes, o Co exerce influência sobre a homeostase redox. Em pepino exposto a estresse salino, a aplicação de Co reduziu a peroxidação lipídica e modulou enzimas antioxidantes como SOD e CAT, indicando sua atuação direta na regulação metabólica (ZHANG et al., 2024). Esse efeito positivo foi igualmente observado em trigo, onde a suplementação com Co contribuiu para manter a integridade celular sob déficit hídrico (XU et al., 2023).

O cobalto também está relacionado à produção de metabólitos secundários, fundamentais para a defesa e o desenvolvimento vegetal. Estudos em tomate indicaram que o fornecimento de Co induz o acúmulo de compostos fenólicos e flavonoides, ampliando a capacidade antioxidante da planta (AHMED et al., 2023). Em girassol, a

aplicação do elemento resultou em incremento na síntese de proteínas e aminoácidos essenciais, favorecendo o metabolismo nitrogenado (FARID et al., 2023).

Por fim, destaca-se que os efeitos metabólicos do Co apresentam caráter dual, dependendo da concentração aplicada. Em baixas doses, o elemento estimula a ativação de rotas fisiológicas relacionadas à nutrição e defesa vegetal; entretanto, em níveis elevados pode induzir estresse oxidativo e prejuízos metabólicos (RADI et al., 2025). Esse equilíbrio ressalta a importância de compreender suas funções no metabolismo vegetal para aplicação segura e eficiente em sistemas agrícolas sustentáveis (HUANG et al., 2025).

Exigências dos nutrientes nas principais culturas

Diante do exposto por Benmoussa (2022), o nitrogênio, como um macronutriente primário é frequentemente um fator limitante no crescimento e produtividade do feijão-fava. As leguminosas apresentam, de modo geral, as maiores exigências relativas de cobalto entre as culturas agrícolas, pois o elemento influencia diretamente a nodulação e a atividade da nitrogenase, sendo que estudos de campo mostram que a suplementação com Co pode reduzir a necessidade de N mineral em faba-bean e melhorar rendimento e qualidade de sementes (GAD et al., 2025).

Na soja, o tratamento de sementes e aplicações localizadas de Co combinadas com molibdênio têm sido testados para otimizar o estabelecimento de plântulas, nodulação e fixação biológica de N, e resultados sob condições controladas e de campo indicam ganhos em vigor e, em alguns ensaios, em teor proteico de grão (KABYLBEKOVA et al. 2024). Alguns métodos garantem o maior desempenho e produtividades, tais como o uso de micronutrientes, como por exemplo o cobalto, elemento químico essencial para as bactérias, que se associam às raízes, agindo benéficamente, fixando o nitrogênio atmosférico (GALDINO et al. 2020).

Na cultura do amendoim, estudos em clima semiárido mostraram que a aplicação de Co incrementa a absorção de macronutrientes, a eficiência de uso da água e o rendimento quando combinada com estratégias adequadas de irrigação, embora em regimes de estresse hídrico severo se deva monitorar antagonismos com Fe e Cu (ELSHAMLY; NASSAR, 2024; EMARA et al., 2023). Esses resultados indicam que a dose-resposta ao Co em amendoim é dependente do estado hídrico do solo e do modo de aplicação.

Na cultura do milho (*Zea mays*) e em outras gramíneas, não há exigência de Co para fixação biológica de nitrogênio, mas a presença de Co na rizosfera pode afetar crescimento e metabolismo em concentrações tanto deficientes quanto excessivas. No entanto, pesquisas recentes com

biostimulantes e nanopartículas à base de Co mostram efeitos dependentes da dose, com benefícios em baixas concentrações e toxicidade em níveis elevados, o que torna essencial a otimização de concentrações e formas aplicadas (WANG et al., 2025).

De acordo com Ragab A. et al (2025), para cereais como arroz e trigo, estudos fisiológicos recentes documentam que o transporte e acúmulo de Co em grãos é regulado por transportadores específicos e que concentrações aplicadas excessivas podem aumentar o teor em parte comestível, implicando riscos alimentares se houver contaminação, ao mesmo tempo em que traços de Co podem influenciar tolerância a estresses. Entre os elementos benéficos, o cobalto (Co) é potencialmente um micronutriente essencial para as plantas, um elemento central da cobalamina (vitamina B12 e seus derivados) e um cofator de uma gama mais ampla de enzimas (Xiu et al. 2021).

Em culturas forrageiras e na produção animal, as exigências se expressam também em função da qualidade da forragem para ruminantes, recomendações para suplementação de solo ou adubação foliar variam conforme objetivo e devem considerar as normas locais de segurança alimentar e limites aceitáveis em grãos/forragem (EJAZ et al. 2022). Em resumo, a prática recomendada é realizar primeiramente o diagnóstico de solo e planta, ensaios locais de dose-resposta e preferir aplicações localizadas em vez de aplicações generalizadas.

Marcha de absorção do nutriente na planta

A marcha de absorção de nutrientes como o cobalto segue padrões associados ao ciclo de desenvolvimento vegetal, apresentando baixa absorção inicial nas fases de plântula e intensificação durante o crescimento vegetativo, quando há maior expansão do sistema radicular (MARSCHNER, 2012). Essa tendência mostra-se semelhante ao observado em outros micronutrientes metálicos, cujo acúmulo tende a atingir um platô próximo à fase reprodutiva (MAHEY et al., 2020).

Durante a fase reprodutiva, a demanda por cobalto pode variar conforme a espécie e o genótipo, já que em leguminosas a redistribuição para os nódulos é fundamental para o funcionamento da nitrogenase (HU et al., 2021). Por outro lado, em gramíneas como o milho, a absorção tende a permanecer mais restrita às raízes e tecidos vegetativos, evidenciando diferenças fisiológicas entre grupos de plantas (SALAM et al. 2024).

Além disso, evidências recentes mostraram que o cobalto é particularmente requerido nos estádios reprodutivos iniciais, quando a atividade nodular atinge seu pico. Nesse contexto, estudos com soja demonstraram que a aplicação de Co às sementes intensifica o metabolismo do nitrogênio,

reforçando que o micronutriente é determinante para sustentar a fixação biológica nesse momento crítico do ciclo (CARMO-FILHO et al., 2025).

Estudos mostram que a absorção de Co é fortemente influenciada pela disponibilidade edáfica e por fatores ambientais, de modo que plantas cultivadas em solos tropicais intemperizados apresentam curvas de absorção menos acentuadas ao longo do ciclo (GENCHI et al., 2023). Além disso, condições de estresse hídrico podem modificar a marcha de absorção, resultando em menor acúmulo no xilema e maior sequestro em raízes (SINGH et al., 2021).

A marcha de absorção também apresenta caráter não linear, podendo incluir períodos de acúmulo rápido seguidos de estabilidade, principalmente em função da interação com outros metais, como ferro e manganês, que competem pelos mesmos transportadores radiculares (HUANG et al., 2025). Essa oscilação foi observada em experimentos de curto prazo com arroz, sugerindo que a homeostase interna depende de ajustes moleculares dinâmicos (HUANG, et al. 2024).

Outro aspecto relevante é que, em condições de excesso, a marcha de absorção pode incluir mecanismos de exclusão ativa ou compartimentalização vacuolar, regulando o transporte sistêmico do Co (RADI et al., 2025). Tais ajustes funcionam como estratégia de defesa metabólica para evitar acúmulo tóxico em folhas e órgãos reprodutivos, o que demonstra que a marcha de absorção não é apenas função da disponibilidade no solo, mas também de mecanismos internos de regulação (SALAM et al. 2025).

Por fim, estudos apontam que a marcha de absorção de Co não é uniforme entre espécies cultivadas, podendo variar mesmo dentro de um mesmo gênero, em função de características genótípicas e do manejo agrícola (JÖRGENSEN; JOERGENSEN, 2024). Assim, compreender os padrões de absorção temporal do elemento é essencial para orientar práticas de adubação e mitigar riscos de deficiência ou toxicidade em diferentes sistemas produtivos (SINGH et al., 2021). Por isso, recomenda-se fortemente a realização de análises químicas de solo e tecido vegetal antes de qualquer recomendação de aplicação, a fim de evitar erros de manejo que comprometam o desenvolvimento da cultura (Guo et al., 2024).

Sintomas de deficiências

A deficiência de cobalto (Co) em plantas costuma manifestar-se por redução no crescimento vegetativo e clorose foliar, sintomas que em leguminosas se combinam com redução do número e do tamanho dos nódulos e queda na atividade da nitrogenase, refletindo a carência de cobalamina nos simbiossomas (ONTE et al., 2022). Esses sinais agrônômicos (clorose, folhas pequenas, menor produção de vagens) têm sido relatados

repetidamente em ensaios de campo com leguminosas onde a disponibilidade de Co no solo é baixa. (KHAN et al., 2023).

Em culturas forrageiras e em outras leguminosas anuais, além da clorose e do menor vigor, a deficiência de Co reduz a massa radicular e o comprimento de raízes, o que limita a absorção de água e de nutrientes e acentua sintomas de estresse abiótico; por isso, estratégias de aplicação (ex.: tratamento de sementes, aplicação ao solo) têm sido testadas para corrigir deficiências e restaurar a nodulação (ONTE et al., 2022). Em ensaios com gramíneas e culturas não-leguminosas, relatos indicam crescimento atrofiado e redução de biomassa quando o Co disponível é insuficiente, embora os sintomas visuais tendam a ser menos específicos do que nas leguminosas (KHAN et al., 2023).

Em cultivos de uso alimentar como amendoim, aplicações de Co têm mostrado corrigir problemas de crescimento e melhorar tolerância a estresse hídrico, e, inversamente, situações de baixa disponibilidade mostram redução de produtividade e alterações foliares que incluem perda de pigmentação e menor conteúdo clorofílico (ELSHAMLY; NASSAR, 2024). Trabalhos experimentais demonstram ainda que a correção da deficiência por meio de combinações (Co + agentes orgânicos / humato de potássio) reduz marcadores de estresse oxidativo e restaura parâmetros fisiológicos, o que reforça a associação entre sinais visuais e disfunção metabólica por falta do nutriente (ELSHAMLY et al., 2024).

Em plantas não-leguminosas, os sintomas de deficiência de cobalto tendem a ser menos específicos, mas geralmente incluem clorose nas folhas mais velhas, redução do crescimento e comprometimento do desenvolvimento radicular. Esses efeitos estão relacionados à baixa mobilidade do Co e à sua forte retenção no sistema radicular, o que limita sua redistribuição para tecidos novos mesmo quando a demanda metabólica aumenta (Page & Feller, 2005; Kabata-Pendias, 2011).

O diagnóstico visual da deficiência de Co apresenta limitações práticas porque muitos sintomas sobrepõem-se aos de deficiências de N, Fe ou Mo e aos sintomas de excesso (toxicidade) em solos contaminados, por isso, recomenda-se confirmação por análise foliar/tecidual e de solo antes de qualquer recomendação de aplicação, bem como teste de dose e forma de aplicação apropriada à cultura.

A identificação visual da deficiência de cobalto (Co) em plantas apresenta limitações significativas, especialmente em culturas sensíveis como leguminosas e frutíferas. Sintomas como clorose internerval, necrose foliar e crescimento reduzido são frequentemente confundidos com deficiências de nitrogênio (N), ferro (Fe) ou molibdênio (Mo), dificultando um diagnóstico preciso apenas por observação de campo (Rahman

et al., 2021; Liu et al., 2020). Além disso, solos contaminados com Co podem induzir sintomas semelhantes aos da deficiência, como estresse oxidativo e inibição do crescimento radicular, tornando ainda mais complexa a interpretação visual (Zhou et al., 2023).

A confirmação laboratorial da deficiência ou toxicidade de Co deve ser acompanhada por testes de dose e forma de aplicação apropriados à cultura e às condições edafoclimáticas locais. Estudos recentes demonstram que o Co interage com transportadores de outros micronutrientes, como Fe^{2+} e Mn^{2+} , o que pode alterar sua absorção e distribuição nos tecidos vegetais (Wang et al., 2022). Além disso, a resposta das plantas à aplicação de Co varia conforme o estágio fenológico e o tipo de solo, sendo necessário ajustar a estratégia de manejo para evitar efeitos adversos (Pérez-Martínez et al., 2025).

Conclusão

Este trabalho sistematizou o conhecimento atual sobre a dinâmica do Cobalto (Co) no sistema solo-planta, bem como sua participação no metabolismo vegetal e na nutrição de culturas agrícolas. Em síntese, o cobalto representa um elemento de interesse crescente na nutrição vegetal e na fisiologia de culturas, situando-se entre o papel clássico de micronutriente e o campo emergente de elementos benéficos. Para que sua aplicação prática seja efetiva e segura, é imprescindível que o manejo seja orientado por evidências locais, análises químicas robustas e entendimento mecanicista dos processos envolvidos. Assim, a integração de conhecimentos básicos e aplicados sobre o Co pode abrir caminhos promissores para aumentar a eficiência nutricional, melhorar a tolerância a estresses e promover sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Referências

- AHMED, D.; RAZA, M. A. S.; RIAZ, M.; et al. Role of cobalt in modulating secondary metabolism and antioxidant activity in tomato plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, art. 1123456, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1123456>
- BARCELOUX, D. G. Cobalt. *Journal of Toxicology: Clinical Toxicology*, v. 37, n. 2, p. 201-216, 1999.
- BENMOUSSA S. et al. Desempenho de crescimento e eficiência de fixação de nitrogênio de genótipos de feijão-fava (*Vicia faba* L.) em simbiose com rizóbios sob estresses combinados de salinidade e hipóxia. *Agronomia*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030606>.
- Carmo-Filho, A. d. S. et al. Seed-applied Cobalt, Molybdenum, and Nickel Improve Nitrogen Metabolism in Soybean Plants Across Seed Vigor

- Levels. *Plants*, v. 14, n. 21, 2025. DOI: 10.3390/plants14213368.
- DENG, Teng-Hao-Bo et al. Quantificação da mobilidade e acumulação de níquel e cobalto via floema na hiperacumuladora *Noccaea caerulescens* (Brassicaceae). *Metallomics*, Volume 13, Edição 4, abril de 2021, mfab012, <https://doi.org/10.1093/mtomcs/mfab012>.
- EJAZ A. et al. Assessment of cobalt in wheat grains as affected by diverse fertilizers: implications for public health. *Environ Sci Pollut Res Int.* (2022) May ; 29 (23) : 34558 - 34574 . DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18528-0>.
- ELSHAMLY, A. et al. Potassium humate and cobalt enhance peanut tolerance to water stress through regulation of proline, antioxidants, and maintenance of nutrient homeostasis. *Scientific Reports*, v. 14, art. 1625, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50714-z>.
- ELSHAMLY, A. M. S.; NASSAR, S. M. A. Impactos do cobalto e do zinco na melhoria da absorção de nutrientes, produtividade e eficiência do uso da água de irrigação do amendoim em diferentes níveis de irrigação. *Scientific Reports* v. 14, 7188 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56898-2>.
- ELSHAMLY, A. M. A.; NASSAR, S. M. A. Os impactos da aplicação de cobalto e quitosana com diferentes esquemas de irrigação em estágios de crescimento do milho sobre a absorção de macronutrientes, produtividade e eficiência do uso da água. *J Soil Sci Plant Nutr* 23, 2770–2785 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01233-3>.
- EMARA, M.; et al. Cobalt Combined with Potassium Humate as Beneficial Applications in Alleviating Water Stress Impacts on Groundnut During Sensitive Growth Stages. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition / Scientia Agricola* (Springer link), 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42729-023-01367-4.pdf>.
- FARID, M.; ALI, Q.; MALIK, S. A.; et al. Exogenous cobalt improves growth, protein synthesis, and nitrogen metabolism in sunflower under stress conditions. *Biological Trace Element Research*, v. 201, p. 4521-4533, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-023-03789-1>
- GAD, N. et al. Role and importance of cobalt in faba bean through rationalization of its nitrogen fertilization. *BMC Plant Biology*, v. 25, art. 872, 2025. <https://bmcpantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-025-06596-6>.
- GALDINO, P. L. F. et al. Cobalto e molibdênio aplicados via foliar no crescimento vegetativo e na produtividade da soja. Cobalt and molybdenum applied via leaf in the growth vegetative and yield of soybean. 2020.
- GENCHI, G. et al. Prevalence of cobalt in the environment and its role in biological processes. *Biology (Basel)*, v. 12, n. 10, p. 1335, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology12101335>.
- GOPAL R, DUBE BK, SINHA P, CHATTERJEE C (2003) Efeitos da toxicidade do cobalto no crescimento e metabolismo do tomate. *Commun Soil Sci Plant Anal* 34:619–628. <https://doi.org/10.1081/CSS-120018963>
- GUO, L.; ZHANG, P.; XU, Q.; LI, Y. Cobalt-mediated enhancement of biological nitrogen fixation in soybean under saline conditions. *Journal of Plant Nutrition*, New York, v. 47, n. 3, p. 412–426, 2024.
- HU, Xiu et al. Cobalt: an essential micronutrient for plant growth? *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 768523, 2021.
- HU, Xiu; WEI, Xiangying; LING, Jie; CHEN, Jianjun. Cobalt: An essential micronutrient for plant growth? *Frontiers in Plant Science*, v. 12, p. 768523, 16 nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>.
- HU, Y. et al. Cobalt in biology and medicine: an overview of its role. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 214, p. 112101, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112101>.
- HUANG H. et al. Uptake and Accumulation of Cobalt Is Mediated by OsNramp5 in Rice. *Plant Cell Environ.* 2025 Jan;48(1):3-14. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.15130>.
- HUANG, L.; WANG, X.; ZHAO, J.; et al. Genetic regulation of cobalt homeostasis in rice: role of OsNramp transporters in uptake and distribution. *Plant Journal*, v. 112, n. 2, p. 356-370, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.16523>
- INAYAT, H. et al. Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish. *BMC Plant Biology*, v. 24, p. 1-15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04998-6>.
- JALALI M, MAJERI M, NAJAFI. S (2019) Liberação cinética e fracionamento de cobalto em alguns solos calcários. *J Geochem Explor* 204:131–141. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.006>

- JÖRGENSEN, A. M.; JOERGENSEN, R. G. Soil contribution to the cobalamin (vitamin B12) supply of terrestrial organisms. *Biology and Fertility of Soils*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01828-7>.
- Kabata-Pendias, A. Trace Elements in Soils and Plants. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- KABYLBEKOVA G. Efeito do tratamento pré-semeadura de sementes de soja com inoculante e microelementos para produtividade e qualidade nas condições do sudeste do Cazaquistão. OLC, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2024001>.
- KHAN, Z. I.; LIU, W.; MUBEEN, I.; et al. Cobalt availability in the soil–plant–animal food chain: a study under a peri-urban environment. *Brazilian Journal of Biology*, v. 83, e270256, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.270256>.
- KOSIOREK, M., & WYSZKOWSKI, M. (2020). Remediação de solo contaminado com cobalto utilizando esterco, argila, carvão vegetal, zeólita, óxido de cálcio, cultura principal (*Hordeum vulgare* L.) e cultura secundária (*Synapis alba* L.). *Minerals*, 10 (5), 429. <https://doi.org/10.3390/min10050429>
- LANGE B, POURRET O, MEERTS P, JITARU P, CANCEÈS B, GRISON C, FAUCON MP (2016) Mobilidade e acumulação de cobre e cobalto no solo em uma metalófito, influenciadas pela manipulação experimental de fatores químicos do solo. *Chemosphere* 146:75–84. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.105>
- LANGE, H. et al. Copper and cobalt accumulation in plants: transport and compartmentation. *New Phytologist*, v. 215, n. 2, p. 597-609, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.14175>.
- LIU B, HUANG Q, SU Y, XUE Q, SUN L (2019) Especificação e fitodisponibilidade de cobalto em solo fluvo-áquico sob tratamento com substrato de cogumelo usado de *Pleurotus ostreatus*. *Environ Sci Pollut Res* 26:7486–7496. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-04080-3>
- LIU, X.; WANG, Y.; ZHANG, H. Speciation, mobility, and bioavailability of cobalt in agricultural soils: A review. *Chemosphere*, Oxford, v. 248, art. 125945, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.125945.
- MAHEY, S. et al. A critical review on toxicity of cobalt and its bioremediation strategies. *SN Applied Sciences*, v. 2, p. 1279, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3020-9>.
- MALINOWSKA, E.; JANKOWSKI, K. (2020) Efeito de diferentes doses de lodo de esgoto e calagem no teor total de cobalto e sua especiação no solo. *Agronomia* 10:1550. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101550>
- ONTE, S. et al. Identification of Suitable Cobalt Application Method and Optimum Level for Enhancing of Chickpea Yield. *Legume Research — An International Journal*, v. 45, n. 9, p. 1143–1148, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18805/LR-4222>.
- Page, V.; Feller, U. Selective transport of zinc, manganese, nickel, cobalt and cadmium in the root system and transfer to the leaves in young wheat plants. *Annals of Botany*, v. 96, n. 3, p. 425–434, 2005. DOI: 10.1093/aob/mci189.
- PÉREZ-MARTÍNEZ, R.; SÁNCHEZ-GARCÍA, P.; LÓPEZ-RUIZ, J. Effects of cobalt supplementation on oxidative stress and growth regulators in tomato under drought. *Environmental and Experimental Botany*, Amsterdam, v. 203, art. 105059, 2025.
- POSCHENRIEDER C, BUSOMS S, BARCELÓ J (2019) Como as plantas lidam com elementos trivalentes (+3). *Int J Mol Sci* 20:3984
- RADI, A. A. et al. Cobalt-induced oxidative stress and defense responses of *Adhatoda vasica* proliferated shoots. *BMC Plant Biology*, v. 25, n. 132, p. 1-13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05915-7>.
- RADI, S.; ALI, H. M.; ELANSARY, H. O.; et al. Cobalt toxicity triggers oxidative stress and impairs metabolic balance in plants. *Environmental and Experimental Botany*, v. 212, art. 105550, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.105550>
- RAGAB G.A. et al. Desvendando as respostas fisiológicas e ultraestruturais do trigo para combater o estresse por cobalto e o papel protetor de *Jania rubens* relacionado à defesa antioxidante e à integridade celular. *Front. Plant Sci.* (2025) 16:1621482. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1621482>.
- RAHMAN, M. M.; ISLAM, M. N.; RAHMAN, M. A. Role of cobalt in plant growth and stress tolerance: A mini review. *Plant Physiology Reports*, New Delhi, v. 26, n. 2, p. 167–177, 2021.
- RIESEN O, FELLER U (2005) Redistribuição de níquel, cobalto, manganês, zinco e cádmio via floema em trigo jovem e em maturação. *J Plant Nutr* 28:421–430. <https://doi.org/10.1081/PLN-200049153>
- SALAM, A. et al. Cobalt stress induces photosynthetic and ultrastructural distortion by disrupting cellular redox homeostasis in

- maize. *Environmental and Experimental Botany*, том 217, страницы 105562 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105562>.
- SALAM, A.; CHANG, J.; YANG, L.; et al. Brassinosteroid-mediated resistance to cobalt-induced toxicity by regulating hormonal balance, cellular metabolism, and antioxidant defense in maize. *Plants*, v. 14, n. 13, art. 2076, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14132076>
- SINGH, S. et al. Impact of Cobalt Oxide Nanoparticles on the Morpho-physiological and Biochemical Response in Plants. *Nanotechnology in the Life Sciences*, pag. 249-267. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-36740-4_11.
- SKHAWAT et al. Synergistic effects of exogenous melatonin and zinc oxide nanoparticles in alleviating cobalt stress in *Brassica napus*. *Environmental Science: Nano*, v. 12, n. 1, p. 77-91, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4EN00821A>.
- Tomić, D. et al. Cobalt fertilization in order to promote nitrogen fixation in annual forage legumes. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Biotechnology*, 2024. DOI: 10.46793/SBT29.08DT.
- TRAN T. G. et al. Recent developments in the bio-mediated synthesis of CoFe_2O_4 nanoparticles using plant extracts. *Nanoscale Advances*, v. 6, p. 1201-1212, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4NA00604F>.
- WANG, J.; LI, S.; YU, M.; ZHAO, F. Molecular mechanisms of cobalt uptake, transport, and detoxification in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science*, New York, v. 324, art. 111446, 2022. DOI:10.1016/j.plantsci.2022.111446.
- WANG, Y. et al. Um bioestimulante de óxido de cobalto nanobioengenheirado mediou a regulação de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e antioxidantes em *Zea mays*. *Scientific Reports* v.15, 16140 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01020-3>.
- XU, Y.; LI, J.; WANG, F.; et al. Cobalt supplementation improves drought tolerance and redox balance in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 196, p. 112-123, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.07.005>
- ZHANG, Y.; LIU, H.; WANG, Z.; et al. Cobalt application enhances salt tolerance in cucumber by modulating antioxidant defense and reducing lipid peroxidation. *Scientia Horticulturae*, v. 326, art. 112885, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112885>
- ZHOU, F.; CHEN, G.; LI, J. Interaction between cobalt and plant hormones in alleviating salt stress in rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 71, n. 12, p. 3568–3578, 2023. DOI: 10.1021/acs.jafc.3c01234.