

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA, MATEMÁTICA E EDUCAÇÃO

RAFAELA DE OLIVEIRA SILVA

**POTENCIAL DE INTERAÇÃO DO QUELATO DE FERRO E AUXINA NA
NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE ACEROLA**

ARARAS - SP

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA, MATEMÁTICA E EDUCAÇÃO

RAFAELA DE OLIVEIRA SILVA

**POTENCIAL DE INTERAÇÃO DO QUELATO DE FERRO E AUXINA NA
NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE ACEROLA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Licenciatura em Ciências
Biológicas, da Universidade Federal de São Carlos,
Campus Araras, como requisito para a obtenção do
título de Licenciatura em Ciências Biológicas.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso.

ARARAS - SP

2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a mim mesma — a todo esforço, dedicação e coragem que me trouxeram até aqui. A Rafaela de anos atrás nem imaginaria o quanto ela seria capaz.

Agradeço à minha mãe, Maria, por me ensinar tanto sobre o amor, a perseverança e por mostrar que sonhar é tão importante quanto viver e valorizar o momento presente.

Aos meus irmãos, Arthur, Gustavo e Gabriela, por me revelarem a beleza e a leveza da vida quando ela é compartilhada, e por me ensinarem que o amor entre irmãos é um dos mais puros e genuínos que se pode ter.

Aos meus primos e irmãos de coração, Thiago e Rodrigo, agradeço por todo o carinho e ternura.

O suporte de todos vocês foi imprescindível não apenas durante a graduação, mas ao longo de toda a minha vida. A força que tenho para seguir em frente todos os dias vem do amor que recebo de vocês — amor que carrego comigo diariamente. Obrigada por acreditarem em mim, até mesmo quando eu mesma não conseguia enxergar isso. Este trabalho é dedicado a vocês.

Às minhas irmãs da República Caipirinhas, que se tornaram minha segunda família ao longo dessa jornada, deixo minha eterna gratidão. Todo o companheirismo, as risadas, o acolhimento diário e as conversas desses cinco anos são momentos que levarei comigo para o resto da vida. O amor que construí pelo nosso lar e por cada uma de vocês é indescritível. Levo vocês e todos os momentos vividos em meu coração, onde quer que eu esteja.

Agradeço também às amigas que fizeram parte da minha história até aqui: Gabriela Borges, Júlia, Carol e Laura. O amor e a gratidão que sinto por vocês são imensuráveis, obrigada por tanto!

Ao meu namorado e companheiro de vida, Luís Eduardo, sou grata por toda a companhia, escuta, paciência e zelo. Obrigada por cada abraço e colo nos momentos em que mais precisei. O amor que sinto por você cresce a cada dia.

Também coloco os meus agradecimentos aos meus sogros Ameliane e Alexandre, por nunca medirem esforços para me ajudar no que fosse necessário e me ensinarem tanto sobre resiliência e compaixão.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jean Carlos Cardoso, por todos os ensinamentos e oportunidades. Sua excelência naquilo a que se propõe e sua paixão pelo trabalho me inspiraram desde a primeira vez que entrei em sua sala de aula. Obrigada por me ensinar a enxergar a natureza com outros olhos!

Por fim, sou grata a todos os colegas e professores que fizeram parte da minha caminhada e a todos que me ajudaram, sem medir esforços, na execução deste trabalho.

RESUMO

A deficiência de ferro (Fe) é uma das principais carências nutricionais em populações humanas, especialmente em regiões de vulnerabilidade social. A aceroleira (*Malpighia emarginata* D.C.), devido ao seu alto teor de vitamina C e considerável valor de carotenóides, apresenta potencial para estratégias de biofortificação voltadas ao combate da anemia ferropriva. Este trabalho teve como objetivo avaliar a interação e os efeitos de diferentes doses de ferro quelatado (Fe-EDDHA), em associação à aplicação de auxina (ácido naftaleno-acético – ANA) em acerolas. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3×2 , totalizando seis tratamentos com quatro repetições. Foram avaliadas três concentrações de ferro (0,0245%, 0,049% e 0,0735%) associadas à aplicação ou não de ANA, na concentração de 10 mg/L. Variáveis fisiológicas, como teor de clorofila b, condutância estomática e eficiência do fotossistema II, demonstraram sensibilidade à interação entre ferro e auxina, indicando efeitos sobre a atividade dos fotossistemas, a transpiração e trocas gasosas. Os resultados apontaram que o aumento das doses de ferro não elevou necessariamente o acúmulo do nutriente nos frutos, sendo que a maior dose (0,0735%) associada a aplicação do ANA resultou em plantas sem frutos. Diferenças entre os teores de ferro nas folhas e nos frutos sugerem restrição à redistribuição desse micronutriente nos diferentes tecidos da planta. A aplicação de auxina afetou parâmetros do solo, como condutividade elétrica e pH, o que pode ter interferido na absorção de ferro pelas plantas. Concluiu-se que altas doses de ferro e a presença de auxina afetam negativamente a produção e a translocação de ferro para os frutos, sendo necessário o ajuste das doses e formas de aplicação. O aumento das doses de ferro, mesmo associado à auxina, não promoveu maior acúmulo do nutriente na acerola, havendo diferenças entre frutos e folhas que sugerem novas investigações sobre os mecanismos de absorção e translocação do ferro. Sugere-se que a aplicação de auxina (ANA) pode estar ligada a inibição de florescimento em plantas com maior dose de ferro, indicando estudos mais aprofundados sobre essa interação.

Palavras-chaves: *Malpighia emarginata*, Ferro (EDDHA), ácido naftalenoacético, nutrição vegetal, produtividade.

ABSTRACT

Iron (Fe) deficiency is one of the main nutritional disorders in human populations, especially in socially vulnerable regions. The acerola tree (*Malpighia emarginata* D.C.), due to its high vitamin C content and considerable carotenoid value, shows potential for biofortification strategies aimed at combating iron-deficiency anemia. This study aimed to evaluate the interaction and effects of different doses of chelated iron (Fe-EDDHA), in association with the application of auxin (naphthaleneacetic acid – NAA), in acerola plants. The experiment was conducted in a completely randomized design (CRD), in a 3×2 factorial scheme, totaling six treatments with four replications. Three iron concentrations (0.0245%, 0.049%, and 0.0735%) were tested, with or without NAA application at 10 mg/L. Physiological variables such as chlorophyll b content, stomatal conductance, and photosystem II efficiency were sensitive to the interaction between iron and auxin, indicating effects on photosynthetic activity, transpiration, and gas exchange. Results showed that increasing iron doses did not necessarily lead to higher nutrient accumulation in fruits, and the highest dose (0.0735%) combined with NAA resulted in plants without fruit production. Differences in iron content between leaves and fruits suggest restrictions on the redistribution of this micronutrient among plant tissues. Auxin application also affected soil parameters such as electrical conductivity and pH, which may have influenced iron absorption. It was concluded that high iron doses and the presence of auxin negatively affect fruit production and iron translocation, indicating the need for adjustments in doses and application methods. Overall, higher iron levels, even when associated with auxin, did not promote greater nutrient accumulation in acerola, highlighting the need for further studies on the mechanisms of iron absorption and translocation. It is suggested that the application of auxin (NAA) may be linked to the inhibition of flowering in plants under higher iron doses, indicating the need for further studies on this interaction.

Keywords: *Malpighia emarginata*, Iron (EDDHA), naphthaleneacetic acid, plant nutrition, biofortification, Yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de experimentação das mudas jovens de acerola (<i>Malpighia emarginata</i>), cultivadas em caixas de isopor com capacidade média de 90 litros.....	26
Figura 2 - Amostras em triplicata de suco de frutos de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA para determinação de Graus Brix a partir de refratômetro.....	28
Figura 3 - Frutos de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) do tratamento de nível 3 de ferro sem auxina pesados em balança analítica de precisão.....	29
Figura 4 - Preparação de amostras de solo para análises de condutividade elétrica e pH de mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>).....	30
Figura 5 - Boxplot para a variável de condutância estomática (gsw) em análises de condutância estomática em plantas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	32
Figura 6 - Determinação de micronutrientes em frutos de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.....	41
Figura 7 - Determinação de micronutrientes em folhas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.....	42
Figura 8 - Determinação de macronutrientes em folhas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.....	43
Figura 9 - Determinação de macronutrientes em frutos de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teste de Kruskal-Wallis para as variáveis ETR e eficiência de fotossistema II para as análises de fotossíntese foliar em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA. Dados não paramétricos.....	31
Tabela 2 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para as variáveis gsw e temperatura foliar em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	32
Tabela 3 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila a em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	33
Tabela 4 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila total em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	33
Tabela 5 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila b em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	33
Tabela 6 - Teores de clorofila a, clorofila b e clorofila total em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA. Índice de clorofila Falker (IFC).....	34
Tabela 7 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável teor de sólidos solúveis em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	35
Tabela 8 - Teores de sólidos solúveis em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	36
Tabela 9 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para as variáveis peso e número de frutos em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	36
Tabela 10 - Determinação de médias para as variáveis peso e número de frutos de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA produzidos ao longo do experimento.....	37

Tabela 11 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para as variáveis de colorimetria seguindo o espaço de cor L* a* b* em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	38
Tabela 12 - Resumo do desdobramento de ferro dentro dos níveis de auxina para a variável b* em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	39
Tabela 13 - Médias de valores representativos do eixo b* seguindo o padrão de leitura de cor CIELAB em mudas de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	40
Tabela 14 - Determinação de condutividade elétrica e pH nas amostras de solo de aceroleira (<i>Malpighia emarginata</i>) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivos gerais.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
3.1 Nutrição de plantas.....	14
3.1.1 Ferro.....	15
3.2.1 Auxinas.....	18
3.2 Malpighia emarginata D.C (Acerola).....	21
3.3 Biofortificação de ferro.....	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 Descrição do experimento.....	25
4.2 Análises.....	26
4.2.1 Eficiência do fotossistema II e condutância estomática.....	26
4.2.2 Teores de clorofila a e b.....	27
4.2.3 Determinação de sólidos solúveis.....	28
4.2.4 Produtividade de frutos.....	28
4.2.5 Colorimetria.....	29
4.2.6 Micronutrientes e macronutrientes.....	30
4.2.7 Condutividade elétrica e pH.....	30
4.3 Análises estatísticas.....	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 Eficiência do fotossistema II e condutância estomática.....	31
5.2 Teores de clorofila a e b.....	33
5.3 Determinação de sólidos solúveis.....	35
5.4 Produtividade de frutos.....	36
5.5 Colorimetria.....	38
5.6 Micronutrientes e macronutrientes.....	40
5.7 Condutividade elétrica e pH.....	44
6. CONCLUSÕES.....	48
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

Alimentos ricos em nutrientes e minerais são essenciais para a manutenção e sobrevivência da vida humana. Conforme Brasil (2013), a alimentação e nutrição constituem-se como requisitos básicos para a promoção e proteção da saúde, e principalmente, da segurança alimentar, sendo fundamentais para o desenvolvimento e bem-estar humano. No entanto, o cenário atual das taxas de desnutrição crônica populacional no Brasil demonstra grande vulnerabilidade, sobretudo em grupos que apresentam vulnerabilidade financeira e social (Brasil, [20-?]).

Para Sichieri *et al.* (2000, p.228), ao propor uma alimentação saudável para a prevenção de doenças crônicas não transmissíveis, é essencial definir formas mais acessíveis e democráticas para as dietas alimentares atingirem diferentes grupos populacionais. Uma alternativa viável para esta problemática é incentivar o consumo de frutas e legumes ricos em nutrientes essenciais.

A presença de micronutrientes e compostos antioxidantes, como os flavonóides, carotenóides, vitaminas, ácido fólico e fibras alimentares em frutas e verduras, é um importante fator na proteção contra doenças (Organização Mundial da Saúde, 2002, p.60). Dentre esses, destaca-se o ferro, sendo um mineral essencial para os seres humanos que desempenha funções vitais, como: o transporte de oxigênio, a síntese de DNA, o metabolismo energético e a atuação como componente de diversas enzimas não heme (Borba *et al.*, 2022).

Na dieta, o ferro está presente em duas formas: o ferro heme, de alta biodisponibilidade, encontrado em alimentos de origem animal, e o ferro não heme, característico dos vegetais, cuja absorção é menos eficiente (Sociedade Brasileira de Pediatria, 2004). No entanto, segundo Hohoff *et al.* (2022), dietas vegetarianas, quando planejadas de maneira adequada, podem suprir esse nutriente de forma econômica, especialmente quando associadas a alimentos que potencializam sua absorção, como o ácido ascórbico.

Segundo Peng e Uprichard (2016), a anemia ferropriva e a anemia crônica representam as causas mais comuns de anemia ao nível global. Nesse contexto, a manutenção da homeostase do ferro torna-se essencial, uma vez que desempenha um papel crucial na patogênese de ambas as condições.

Como uma alternativa de combate a esse problema, foram implementados, em diferentes países, programas de fortificação de alimentos, bem como estabelecidas diretrizes específicas para suplementação do mineral, como o desenvolvimento de protocolos terapêuticos envolvendo a administração de ferro por via oral e intravenosa (Krafft; Murray-Kolb; Milman, 2012).

No Brasil, existem Programas Nacionais de Suplementação de Micronutrientes, sendo eles: NutriSUS (Fortificação da alimentação infantil com micronutrientes em pó); Programa Nacional de Suplementação de Ferro (PNSF) e Programa Nacional de Suplementação de Vitamina A (PNSVA). Segundo o Caderno dos Programas Nacionais de Suplementação de Micronutrientes, atualmente, essas suplementações são realizadas a partir do consumo dos micronutrientes por via oral na forma de sachês e cápsulas (Brasil, 2022). Porém, Vellozo e Fisberg (2010) ressaltam que a suplementação medicamentosa possui algumas problemáticas, como a sua distribuição inadequada pela rede de saúde, dificuldade de acesso ao medicamento, falta de monitoramento após a aplicação e a rejeição por parte de alguns indivíduos pelo sabor metálico e pouco agradável.

Nesse contexto, a fortificação alimentar surge como alternativa promissora, pois garante ampla cobertura populacional sem exigir mudanças significativas nos hábitos alimentares, além de apresentar baixo risco de toxicidade quando realizada de forma segura e regulamentada (Brasil, 1998; Zancul, 2004).

Segundo o CEPEA (2018), o cultivo de acerola se torna cada vez mais atrativo no Brasil e para demandas externas, devido à possibilidade de múltiplas safras no longo do ano e a precocidade de produção, sendo grandes vantagens para a popularização da fruta. Além disso, Simopoulos e Gopalan (2003) apontam que o consumo de acerola e de seus subprodutos oferecem resultados potencialmente elevados quando comparado ao consumo de compostos sintéticos isolados.

Conhecer a composição nutricional é essencial ao selecionar plantas com potencial para fortificação e sua recomendação na dieta. A acerola destaca-se por apresentar teores expressivos de β -caroteno, com concentrações médias entre 12,4 e 38,1 $\mu\text{g g}^{-1}$ em frutos maduros, sendo considerada uma boa fonte de carotenoide provitamina A. Além disso, sua composição inclui outros carotenóides relevantes, como neoxantina, violaxantina, luteína, β -criptoxantina e α -caroteno (Porcu; Rodriguez-Amaya, 2006). Considerando a importância

da combinação e biodisponibilidade de nutrientes para a absorção de ferro pelo organismo, estudos indicam uma correlação positiva significativa entre o β -caroteno e o ferro dialisável, sugerindo que o composto pode atenuar os efeitos de fatores antinutricionais e favorecer a absorção do mineral (Machado; Canniatti-Brazaca; Piedade, 2006).

Diante disso, torna-se necessário ampliar os estudos sobre a fortificação de ferro em frutas ricas em carotenóides, bem como compreender os aspectos nutricionais da cultura durante a aplicação dessas técnicas (Floriano *et al.*, 2018).

Um melhor entendimento sobre a absorção de ferro em plantas ricas em carotenóides é fundamental para o desenvolvimento de futuros protocolos que visem a biofortificação com ferro. Estudos que investigam a associação entre esse mineral e fitorreguladores tornam-se imprescindíveis para aprofundar a compreensão do tema, especialmente considerando que a literatura já comprova a influência da auxina na absorção de ferro em plantas sob deficiência desse nutriente (Garnica *et al.*, 2018). Diante disso, a realização de novos testes mostra-se essencial para o desenvolvimento de alternativas que minimizem os efeitos das deficiências nutricionais.

Nesse sentido, este trabalho visa avaliar a interação entre ferro e auxina em aceroleiras (*Malpighia emarginata*), com foco na influência do fitorregulador sobre a absorção do mineral e na compreensão dos mecanismos ligados à nutrição e à produtividade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Avaliar a interação e os efeitos de diferentes doses de ferro quelatado (Fe-EDDHA), em associação à aplicação de auxina (ácido naftaleno-acético – ANA) em acerolas (*Malpighia emarginata*).

2.2 Objetivos específicos

- Testar diferentes concentrações de quelato de ferro (Fe-EDDHA) em mudas de acerola (*Malpighia emarginata*);

- Avaliar os efeitos da aplicação de ferro via solo em combinação com a presença ou ausência do fitorregulador ácido naftalenoacético (ANA), com foco na interação entre esses fatores no metabolismo da planta;
- Analisar a resposta fisiológica das plantas aos tratamentos, a partir da análise de eficiência do fotossistema II e da condutância estomática;
- Verificar a influência dos tratamentos sobre parâmetros de qualidade dos frutos, como teor de sólidos solúveis totais e coloração;
- Quantificar os teores de macro e micronutrientes em folhas e frutos, com ênfase na concentração de ferro, a fim de avaliar a eficiência de sua absorção pelas plantas;
- Avaliar a condutividade elétrica e o pH do substrato, a fim de monitorar possíveis alterações nas condições do meio de cultivo em função dos tratamentos aplicados.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Nutrição de plantas

As plantas são organismos autotróficos que utilizam íons inorgânicos presentes no ambiente e os transformam em moléculas orgânicas para sua constituição física e metabólica, a fim de garantir sucesso no seu crescimento e desenvolvimento (Kerbauy, 2004). A capacidade das plantas em absorver íons inorgânicos em baixas concentrações da solução do solo devido a extensa área de superfície radicular, torna esses organismos altamente eficazes em absorção mineral. Esses elementos, após serem absorvidos, são translocados para diferentes áreas da planta e utilizados para diversas funcionalidades biológicas, como composição do ciclo biogeoquímico, complexos enzimáticos e manganês, relações simbióticas entre plantas, fungos e bactérias, entre outras (Taiz; Zeiger, 2006).

Os nutrientes minerais para serem considerados essenciais devem atender três requisitos definidos: (1) a planta não consegue completar seu ciclo sem a presença do elemento; (2) o elemento tem função específica e não é substituível; (3) o elemento deve estar envolvido no metabolismo da planta e ser um constituinte essencial ou participar de um processo metabólico específico (Kerbauy, 2004).

Utilizando como base as análises elementares da matéria seca da soja, os elementos C, O e H representam 90% do total da massa e os 10% restantes se distribui entre os demais minerais essenciais, como: N, K, Ca, P, Mg e S (macronutrientes), Fe, Mn, B, Cu, Zn, Mo, Co, Ni, Se (micronutrientes). Em geral, os teores de macronutrientes são expressos em porcentagem (%) e os micronutrientes em partes por milhão (ppm), todos na forma elementar. Essa classificação se estabelece a partir da concentração exigida pelas plantas (Faquin, 2005).

Todos os elementos essenciais estão presentes na planta; mas nem todos os elementos são considerados essenciais (Arnon; Stout, 1939). Apesar de possuírem mecanismos eficientes de absorção e transporte de nutrientes minerais, as plantas não apresentam seletividade absoluta, podendo absorver íons não essenciais ou até mesmo tóxicos presentes no meio.

Segundo Malavolta (2006), os elementos essenciais são fundamentais à sobrevivência das plantas, uma vez que participam ativamente dos processos metabólicos e do crescimento vegetal. Além desses, há uma classe de elementos considerados benéficos, cuja presença, em determinadas condições, contribui para o desenvolvimento e o aumento da produtividade das plantas, como o sódio e o silício. No entanto, a depender do nível de fornecimento, tanto os elementos essenciais quanto os benéficos podem tornar-se tóxicos para as plantas.

3.1.1 Ferro

O ferro é considerado um elemento ubíquo devido à alta frequência da sua aparição e composição em elementos da Terra, como em rochas da litosfera e seres vivos (Malavolta, 2006). É um micronutriente essencial para as plantas, desempenhando funções cruciais em diversos processos fisiológicos, atuando como componente de grupos prostéticos em enzimas, participando de reações de oxirredução. Além disso, o ferro está presente em hemoproteínas, como citocromos, leg-hemoglobinas, catalase e peroxidase, fundamentais para o transporte de elétrons e defesa antioxidante. Também integra proteínas não-heme com centros ferro-enxofre (Fe-S), como a ferredoxina, que participa de processos como a fotossíntese, respiração celular e a fixação biológica de nitrogênio (Dechen; Nachtigall, 2007; Neto, 2009).

Em ambientes de solo aeróbicos, ou seja, na presença de oxigênio, o ferro encontra-se predominantemente na forma férrica (Fe^{3+}), formando óxidos como a hematita (Fe_2O_3) e complexos com ligantes orgânicos. Com o aumento da matéria orgânica, há formação de

complexos solúveis de ferro, incluindo a forma ferrosa (Fe^{2+}). Em condições anaeróbicas, como em solos alagados, ocorre a redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} , aumentando sua solubilidade e disponibilidade para as plantas (Fageria; Baligar; Jones, 2002; Malavolta, 2006).

Solos como o Latossolo Roxo (Terra Roxa Legítima) possuem elevado teor de Fe_2O_3 , resultante do intemperismo de rochas máficas ricas em ferro, como basaltos e diabásios. Essa composição confere ao solo a coloração avermelhada característica, devido à presença de óxidos de ferro, evidenciando que o teor total de ferro está diretamente relacionado ao conteúdo do elemento no material de origem. No entanto, deficiências de ferro nas plantas ocorrem, em parte, pela baixa disponibilidade do micronutriente na forma absorvível Fe^{2+} (Malavolta, 2006; Souza; Lobato, 2021). Fatores como a matéria orgânica, o potencial redox, a temperatura, a umidade, a atividade microbiana, a competição por locais de adsorção e, principalmente, o pH alcalino do solo – condição na qual a solubilidade do ferro é reduzida – influenciam diretamente a disponibilidade de ferro para as plantas (Moreira *et al.*, 2017).

Para facilitar a absorção e evitar a deficiência mineral, as plantas, ao longo de seu processo evolutivo, desenvolveram duas estratégias para a captação de ferro (Fe). A Estratégia I é adotada por plantas dicotiledôneas e monocotiledôneas não gramíneas. Nessa estratégia, ocorre a acidificação da rizosfera por meio da liberação de prótons H^+ , promovida pelas enzimas H^+ -ATPases presentes nas membranas plasmáticas. Esse processo provoca a dissolução de compostos de Fe^{3+} e sua posterior redução a Fe^{2+} , aumentando sua solubilidade com o auxílio da proteína Ferro Quelato Redutase (FRO). Já a estratégia II, característica das gramíneas, baseia-se na secreção de fitosideróforos – aminoácidos não proteicos sintetizados pelas raízes das plantas – por meio do transportador TOM 1, localizado na membrana plasmática das células radiculares. Esses fitosideróforos quelam o ferro férrico (Fe^{3+}), formando complexos solúveis (Fe^{3+} -FS), que são reconhecidos e absorvidos pela planta através do transportador Yellow Stripe 1 (YS1), possibilitando o transporte do ferro para o interior da raiz (Marschner; Römheld, 1994; Alexandre *et al.*, 2012; Colodete *et al.*, 2024).

De acordo com Malavolta (2006), os problemas relacionados à toxicidade e à deficiência de ferro nas plantas estão diretamente associados à sua disponibilidade no solo. Em ambientes cultivados sob condições de inundação, como ocorre no cultivo de arroz, ou em solos sujeitos ao encharcamento, há o consumo de O_2 disponível a partir da atividade microbiana, resultando na queda do potencial redox e do pH. Esse processo favorece a redução do ferro férrico (Fe^{3+}) para ferroso (Fe^{2+}), aumentando significativamente sua

solubilidade. Nesses casos, as concentrações de Fe^{2+} podem atingir níveis elevados, chegando a 1.680 mg/L, tornando o ambiente supersaturado em ferro, provocando o acúmulo de Fe nas folhas. Os sintomas de toxicidade podem ser observados a partir das folhas, onde ocorre o aparecimento de manchas marrons da base até atingir ápice foliar, baixo perfilhamento e grandes reduções na produtividade da cultura (Audebert; Sahrawat, 2008).

Já em solos calcários, há a ocorrência da clorose férrica, uma condição causada principalmente pela alta concentração de íons bicarbonato (HCO_3^-) e considerado um dos principais problemas nutricionais em plantas cultivadas nesses ambientes. Esses íons neutralizam os prótons (H^+) bombeados pelas raízes, dificultando a acidificação da rizosfera. Como consequência, ocorre o aumento do pH próximo à membrana plasmática, o que compromete os processos redox necessários para a redução do ferro férrico (Fe^{3+}) à forma ferrosa (Fe^{2+}) (Malavolta, 2006). Dentre os sintomas nas plantas, há o aparecimento de um fino reticulado, principalmente em folhas jovens, onde somente as nervuras das plantas permanecem verdes e o restante são “desbotados”, configurando um tom amarelado. Em estados avançados, os sintomas podem afetar toda a planta, levando a necrose de folhas e até mesmo outros órgãos vegetais (Pestana; Varennes; Correia, 2014).

Uma grande parte dos solos no mundo é composto por calcário, tornando o elemento Fe insolúvel, imóvel e indisponível para a planta. Além disso, com o aumento dos sistemas de cultivos intensivos, as mudanças nas práticas de manejo do solo alteram a disponibilidade de micronutrientes frequentemente, afetando a produção e rendimento de culturas alimentícias (Fageria; Baligar; Wright, 1990).

Diante da relevância do ferro e sua complexa participação na dinâmica do solo e plantas, várias abordagens têm sido utilizadas para a prevenção e correção da sua deficiência em plantas (Arcas *et al.*, 2024). Dentre as técnicas de correção, evidencia-se a aplicação de quelatos sintéticos, como o Fe-EDDHA, que apresenta maior estabilidade em pH elevado, sendo mais eficaz que outras formas, como Fe-EDTA (Cometti *et al.*, 2006). A adubação foliar com sais de ferro (sulfato ou citrato) também representa uma alternativa eficiente para respostas rápidas, sobretudo em cultivos sensíveis à clorose férrica (El-Jendoubi *et al.*, 2014). Estratégias sustentáveis, como o uso de biofertilizantes com microrganismos promotores do crescimento vegetal (PGPR), capazes de produzir sideróforos, têm demonstrado resultados promissores na liberação e disponibilização do ferro na rizosfera (Wang *et al.*, 2022). Além disso, resíduos industriais tratados e biochar modificado com ferro (Fe-biochar) têm sido

empregados para aumentar a biodisponibilidade de ferro e melhorar as propriedades físico-químicas do solo (Algethami *et al.*, 2023). Em situações de toxicidade, frequentemente observadas em solos mal drenados cultivados com arroz irrigado, práticas como a drenagem intermitente e o fornecimento de magnésio mostraram-se eficazes na atenuação dos efeitos do excesso de ferro, reduzindo sintomas de bronzeamento foliar e promovendo maior equilíbrio na homeostase do metal (Rajonandraina *et al.*, 2023).

Além disso, a biofortificação se torna uma estratégia interessante visando o aumento do micronutriente em tecidos de plantas a partir do uso de diferentes métodos, como fertilizantes com ferro em sua composição (via agrônômica), melhoramento convencional ou transgenia (via genética) ou o uso de rizobactérias associadas (via microbiológica) (Cipriano *et al.*, 2024; Roriz *et al.*, 2020). Em culturas como arroz e trigo, já foram obtidas linhagens com maior acúmulo de ferro nos grãos, a partir da superexpressão de genes relacionados ao transporte e armazenamento do micronutriente, como Ferritina e IRT1 (Saini *et al.*, 2024; Tanin *et al.*, 2024). Tais avanços evidenciam que o manejo integrado, aliado às estratégias de correção no campo, consolida a biofortificação como uma abordagem promissora para aumentar a eficiência da nutrição vegetal e a qualidade nutricional dos alimentos, promovendo a produtividade agrícola e benefícios à saúde pública, simultaneamente.

3.2.1 Auxinas

Hormônios vegetais são compostos orgânicos que produzidos em baixas concentrações (10^{-4} M), tem a ação de promover, inibir ou modificar processos fisiomorfológicos nas plantas, como na germinação, crescimento, desenvolvimento e produtividade. Já os fitorreguladores são substâncias sintetizadas e aplicadas de forma exógena, que possuem ações similares aos hormônios, podendo ser aplicados em diferentes partes da planta, como sementes, folhas, raízes, frutos e caules, a depender da ação de interesse (Vieira, 2001; Moreti, Pereira; Althman, 2018).

As auxinas foi o primeiro grupo de hormônios vegetais a ser descoberto durante o século XIX por Charles Darwin e, posteriormente, isolado e caracterizado como ácido indolil-3-acético (AIA), sendo a auxina natural mais presente e ativa em plantas (Paulilo; Viana; Randi, 2015). Apesar disso, a depender da espécie, estação do ano e condição para desenvolvimento, outras auxinas naturais (hormônios) podem ser encontradas, como análogo

clorado do AIA, ácido 4-doroindolil- 3-acético (4 dorAIA), o ácido fenilacético e o ácido indolil-3 butírico (AIB) (Kerbaux, 2004).

Dentre as principais funções das auxinas, destacam-se: a inibição do crescimento das gemas laterais em favor da gema apical (dominância apical), a formação de raízes laterais e adventícias por meio da estimulação da divisão celular no periciclo, o retardamento da abscisão foliar, a regulação do desenvolvimento de gemas florais e frutos, além da indução à diferenciação vascular. As auxinas também são essenciais para o crescimento celular, pois aumentam a plasticidade da parede celular, permitindo o alongamento das células (Taiz; Zeiger, 2006; Vieira, 2001).

A biossíntese do AIA ocorre principalmente em tecidos com alta taxa de divisão celular e crescimento, como os meristemas apicais, folhas jovens, frutos em desenvolvimento e sementes. Por ser um hormônio cujo principal precursor é o aminoácido triptofano, as plantas convertem esse composto em AIA por meio de uma via em duas etapas: primeiro, o triptofano é convertido em indol-3-piruvato (IPyA) por ação da família de enzimas TAA (triptofano aminotransferases), em seguida, o IPyA é convertido em AIA por enzimas da família YUC (flavina monooxigenases) (Taiz *et al.*, 2015). Após sua síntese, o AIA é distribuído de maneira polarizada ao longo do corpo da planta, um mecanismo essencial para a formação de padrões morfogenéticos. Esse transporte polar depende da ação coordenada de proteínas transportadoras, como as efluxinas da família PIN, as influxinas AUX1/LAX e as bombas do tipo PGP (permease glicoproteica) associadas a proteínas ABCB (Taiz *et al.*, 2015; Vanneste; Friml, 2009). A localização assimétrica dessas proteínas nas membranas celulares é determinante para a direção do fluxo de auxinas, e sua expressão é regulada por fatores hormonais e ambientais, como fototropismo, gravitropismo e estresses abióticos (Peer, 2013). Assim, o transporte polar de auxinas constitui um sistema altamente dinâmico e sensível, responsável por orientar os processos de diferenciação celular, alongamento e desenvolvimento radicular e caulinar, a depender da concentração.

Diversos mecanismos hormonais já estabelecidos mostram que as proteínas transportadoras PIN são fundamentais para o transporte polar de auxinas, sendo essenciais para respostas de fototropismo e gravitropismo nas plantas. No caso das raízes, essas proteínas são relocizadas para a face inferior das células da columela em resposta ao estímulo gravitacional, promovendo a redistribuição assimétrica de auxina. Esse mecanismo direciona o crescimento da raiz para regiões favoráveis do solo, auxiliando indiretamente a

absorção de água e nutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal (Taiz; Zeiger, 2006). O controle do alongamento radicular exercido pela auxina depende da sua concentração. Em níveis mais baixos, como até 10^{-8} M, a auxina estimula o crescimento das raízes, enquanto em concentrações mais elevadas, esse hormônio exerce efeito inibitório sobre o desenvolvimento radicular (Taiz; Zeiger, 2006).

Segundo Vieira (2001), o uso de fitorreguladores na agricultura tem contribuído significativamente para o aumento da produtividade de diversas culturas. Entre os compostos mais utilizados destacam-se: o ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), o ácido naftalenoacético (NAA) e o ácido indolbutírico (IBA).

Estudos recentes demonstram o papel central da auxina na modelagem de características arquitetônicas da raiz em resposta às disponibilidades e absorção de nutrientes e água pelas plantas em solos heterogêneos. Evidências sugerem que a manipulação da via da auxina e proteínas transportadoras podem levar ao desenvolvimento de cultivares mais eficientes na absorção de recursos (Liu; Wirén, 2022).

O uso de auxinas sintéticas tem se mostrado uma estratégia eficiente no desenvolvimento de plantas, especialmente em frutíferas, devido à sua atuação na indução do enraizamento, na formação de tecidos e no crescimento vegetal. Pesquisas realizadas com diferentes espécies, como figueira, macieira e cafeeiro demonstram que compostos como o ácido indolbutírico (AIB), ácido naftalenoacético (ANA) assimilados a nutrientes estimulam a formação de raízes adventícias, principalmente em estacas vegetativas, promovendo maior eficiência na propagação de mudas e no desenvolvimento do sistema radicular (Ohland et al., 2009; Ono, Rodrigues; Pinho, 1992; Singh *et al.*, 2019).

Esse efeito ocorre devido à capacidade das auxinas de estimular a divisão e alongação celular nas regiões de diferenciação, além de modular a expressão de genes associados ao desenvolvimento radicular (Östin *et al.*, 1998). Estudos ainda apontam que a resposta das plantas à aplicação de auxinas pode variar conforme a espécie, o tipo de tecido, a concentração utilizada e as condições ambientais, tornando essencial o ajuste desses parâmetros para maximizar os resultados (Jedličková *et al.*, 2022; Bargmann *et al.*, 2013). Além disso, as auxinas exercem papel essencial na redistribuição dos assimilados e na arquitetura radicular, fatores diretamente ligados à maior eficiência na absorção de água e

nutrientes, contribuindo, assim, para a melhoria do desempenho fisiológico e produtivo das plantas (Giehl; Wirén, 2014).

Estudos também reforçam a complexa interação hormonal envolvida na resposta das plantas à deficiência de ferro. Chen *et al.* (2010), ao investigarem *Arabidopsis thaliana*, demonstraram que a elevação dos níveis endógenos de auxina sob deficiência de ferro está associada ao aumento da atividade da redutase férrica (FCR) nas raízes, bem como à maior expressão dos genes *FIT* e *FRO2*. Além disso, os autores identificaram o óxido nítrico (NO) como um sinalizador essencial que atua a jusante da auxina nesse processo. A aplicação exógena de auxina ou doadores de NO estimulou fortemente a atividade de FCR, enquanto o bloqueio do transporte polar de auxina ou a inibição da síntese de NO suprimiu essa resposta. Mutantes com superprodução de auxina apresentaram respostas aumentadas à deficiência de ferro, mas essas respostas foram suprimidas quando o NO foi eliminado. Por outro lado, mutantes com transporte de auxina comprometido, como *aux1-7*, ou com deficiência na produção de NO (*noal*, *nia1 nia2*) apresentaram respostas enfraquecidas, mesmo diante da deficiência de ferro. Esses resultados evidenciam uma via de sinalização coordenada, na qual a auxina atua como sinal inicial e o NO como mediador necessário para a ativação efetiva dos mecanismos de absorção de ferro nas raízes.

3.2 *Malpighia emarginata* D.C (Acerola)

A acerola pertence à família Malpighiaceae, a qual possui cerca de 63 gêneros e 850 espécies (Oliveira *et al.*, 2003). Tem como origem a América Central e norte da América do Sul, onde se encontram climas tropicais e subtropicais e se desenvolve em temperaturas entre 15 °C a 32 °C (Gomes; Oliveira; Filho 2003). Apesar da espécie ocorrer em regiões com alta e baixa umidade relativa do ar, seu florescimento se torna viável em épocas quentes e chuvosas, onde há elevação da taxa de precipitação. Já em épocas de seca e frio, a planta se mantém em repouso vegetativo (Pio, 2003).

Dentre os aspectos morfológicos da planta, a acerola é uma planta arbustiva média, podendo atingir entre 2,5 a 3,0 metros de altura em sua fase adulta. Possui folhas opostas ovaladas ou elípticas com base e ápice agudos e pecíolo curto. Já suas flores são hermafroditas com pedúnculos longos e cachos axilares contendo de 3 a 5 flores, podendo variar entre as cores branca, rosa-claro e escuro ou violetas antes da fecundação e a depender

do genótipo. Os frutos são do tipo drupa tri-pirenóide com epicarpo fino, mesocarpo carnoso e endocarpo constituído de 3 caroços alongados que protegem a semente, apresentando casca vermelha e polpa vermelho-alaranjada ou amarela. Além disso, sua polpa compõe em média 70% da composição do fruto e apresenta acidez, em razão da presença de ácido málico em sua composição (Oliveira *et al.*, 2003).

Quanto à composição do fruto, a acerola possui como seu maior atrativo nutricional a sua alta concentração de vitamina C, apresentando teores entre 1000 a 3000 mg de ácido ascórbico por 100g de polpa, além de teores significantes de pró-vitamina A (408 mg/100g) e vitaminas do grupo B (Folegatti; Matsuura, 2003). Assis, Lima e Oliveira (2001) também relatam que a presença de carotenóides, tiamina, riboflavina, niacina e, principalmente, a presença de ferro, cálcio e fósforo potencializa a procura e interesse pelo fruto de acerola para fins nutricionais e medicinais.

Ao que se refere o manejo e conservação do solo, a maioria dos pomares de acerola estão presentes em solos tropicais, os quais são caracterizados por alto grau de intemperização, alto índice de acidez, baixa troca catiônica (CTC) e bases trocáveis. Essas zonas tropicais apresentam temperaturas mais elevadas e atmosfera com alta taxa de oxidação, onde a matéria orgânica se degrada com rapidez, tornando o solo baixo em nutrientes. Destarte, aumentar o nível de matéria orgânica nos solos é a melhor alternativa para potencializar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo para a alta produtividade, além de realizar o preparo do solo de forma adequada e implementar sistema de irrigação a depender da área de cultivo (Souza; Gomes; Souza, 2003).

Os pomares comerciais de acerola no Brasil até a década de 90 eram formados a partir de plantas de origem sexuada, tendo alta segregação do material e, conseqüentemente, características variáveis (Netto *et al.*, 1996). Em decorrência desse fato, a grande desuniformidade das mudas se tornou um grande problema na produtividade e qualidade dos frutos (Oliveira *et al.*, 2003).

Como alternativa, o uso de métodos de propagação vegetativa foram adotados, a fim de obter plantas mais uniformes e com características superiores. Dentre esses métodos, Ribeiro *et al.*, (2005) descrevem que a enxertia se destaca pela utilização de porta-enxertos provenientes de sementes, os quais proporcionam a formação de um sistema radicular mais vigoroso e explora um maior volume de solo, além de aumentar a precocidade de produção.

Para o sucesso propagativo, as sementes selecionadas devem ser provenientes de porta-enxertos com matrizes vigorosas, boa produção de frutos, alto percentual de viabilidade de sementes, tolerância e resistência a nematóides, pragas e doenças que atacam a cultura e que apresente um bom comportamento em resposta ao estresse hídrico (Oliveira *et al.*, 2003).

No que diz respeito à pós-colheita, os frutos mantêm atividade metabólica ativa mesmo após a sua retirada da planta, tendo alterações físicas, químicas e bioquímicas até o momento de consumação. Manter as propriedades do fruto após sua fase de maturação, como teor de açúcares, acidez total titulável, coloração, firmeza da casca e polpa e succulência do fruto interfere diretamente no consumo final do produto e nas suas características organolépticas (Reinhardt; Oliveira, 2003).

Laurindo (2024) afirma que a depender da técnica de cultivo utilizada na área e sua finalidade, as plantas de acerola são capazes de produzir no mínimo entre 3 a 4 vezes no ano seus frutos, podendo chegar até 8 ciclos por ano.

No Brasil, há registros do cultivo de mudas de acerolas em pomares desde o século XIX na cidade do Rio de Janeiro. Sua implementação ocorreu em 1958 na região do Nordeste na Universidade Federal Rural de Pernambuco pela professora Maria Celene Cardoso de Almeida, a partir de sementes provenientes de Porto Rico. Já no início dos anos 90, há registros de um crescimento expressivo de acerola no país, dado que a possibilidade de ganhos com a produção do fruto em curtos períodos em relação à demanda dos consumidores era bastante atrativa (Filho; Oliveira, 2003).

Estima-se o total de área plantada com acerola ultrapasse 10.000 hectares, com ênfase a região Nordeste (Bahia, Ceará, Paraíba e Pernambuco), a qual se destaca com um volume de produção de até 60% do total nacional, contribuindo de forma significativa para a ocupação do Brasil como líder mundial de produção de acerola (Filho; Oliveira, 2003).

Segundo Queiroga *et al.*, (2023), o fruto da aceroleira passou a ter importância econômica tanto para o consumo *in natura*, quanto a partir das alternativas de aproveitamento, principalmente a partir da produção de polpa pasteurizada congelada e suco pasteurizado, devido a sua perecibilidade e acidez, viabilizando diferentes possibilidades de crescimento do mercado da cultura.

3.3 Biofortificação de ferro

No Brasil, a ingestão de alguns micronutrientes essenciais, como ferro, cálcio, zinco e selênio, ainda permanece abaixo dos níveis recomendados ou apresenta baixa biodisponibilidade nas dietas. Essa deficiência tem sido evidenciada por parâmetros bioquímicos inferiores aos valores de referência em grupos populacionais de risco, reforçando a necessidade de intervenções nutricionais. Diante desse cenário, considera-se que a cooperação entre a comunidade científica, o setor industrial e o governo configura-se como uma estratégia promissora para a mitigação desse problema e para a implementação de soluções eficazes (Nutti; Carvalho; Watanabe, 2006).

O incremento do valor nutricional de culturas amplamente consumidas mundialmente desponta como uma estratégia sustentável para atenuar os efeitos da deficiência de micronutrientes na população (Rios *et al.*, 2009). Nesse contexto, a biofortificação tem sido apontada como uma alternativa viável, uma vez que busca aumentar os teores de micronutrientes específicos nas partes comestíveis das plantas (Gonçalves *et al.*, 2015). Essa técnica pode ser realizada por dois caminhos principais: por meio do melhoramento genético das culturas, utilizando transgenia ou métodos convencionais, sendo essa abordagem denominada biofortificação genética ou por meio do manejo agrônomo, com a aplicação direta de nutrientes ao solo ou à parte aérea das plantas, caracterizando a biofortificação agrônoma (Vergutz *et al.*, 2016).

Segundo Vergutz *et al.* (2016), a biofortificação agrônoma surge como uma estratégia sustentável e complementar aos programas de fortificação e suplementação, evidenciando que as práticas agrônomicas deixaram de focar exclusivamente na produtividade, passando a também contemplar a qualidade nutricional dos alimentos. Esse tipo de biofortificação combinada ao ferro, foco deste estudo, consiste na aplicação de fertilizantes em diferentes formas, como sulfatos, quelatos ou fontes orgânicas, visando a sua absorção pelas plantas e, posteriormente, a translocação para os órgãos de interesse, como os frutos. No entanto, a eficácia desse processo depende de diversos fatores, como o pH e a condutividade elétrica do solo, a forma química do ferro, as interações com outros nutrientes e a fisiologia da planta (Cakmak, 2008).

Kim e Guerinot (2007) explicam que as plantas possuem mecanismos regulatórios que limitam a absorção de ferro em condições de excesso, como a redução da expressão de

transportadores e a ativação de sistemas de defesa, restringindo, assim, seu acúmulo nos tecidos comestíveis. Morrissey e Guerinot (2009) complementam, destacando que a homeostase do ferro nas plantas é fortemente controlada por vias moleculares específicas, com participação de proteínas de armazenamento, como a ferritina, e transportadores das famílias ZIP e IRT.

Além disso, Andrade-Sifuentes *et al.* (2024) salienta que a biofortificação é uma estratégia eficaz para atender às necessidades humanas de micronutrientes, permitindo a ingestão da quantidade diária recomendada por meio de porções menores de alimentos, o que contribui para a redução dos índices de subnutrição na população.

Ceccherini *et al.* (2024), em estudos sobre a biofortificação de ferro em rúcula baby leaf cultivada em sistema hidropônico, demonstraram que a aplicação de solução nutritiva contendo $7,2 \text{ g } 1.000 \text{ L}^{-1}$ de ferro resultou em maior concentração do micronutriente nas folhas. Além disso, experimentos voltados para a biofortificação de ferro a partir da pulverização foliar em tomateiros demonstraram um aumento de até 2,5 vezes maior nos teores de ferro nos frutos, sem alterações negativas na sua morfologia (Coelho *et al.*, 2021). Apesar disso, estudos voltados para a biofortificação de sementes de tomateiro com a aplicação de fertilizantes à base de ferro em diferentes concentrações demonstraram uma perda de germinação e desenvolvimento das plântulas (Guirra *et al.*, 2015).

Portanto, compreender os mecanismos fisiológicos, bioquímicos e ambientais que influenciam a absorção, translocação e o acúmulo de ferro é fundamental para o êxito de futuros programas de biofortificação em espécies frutíferas, especialmente diante da escassez de estudos voltados a esse grupo. Um exemplo é a acerola, que se destaca pelo seu elevado potencial nutricional. Estudos como os de Bashir *et al.* (2013) reforçam que o êxito da biofortificação com ferro depende de fatores como a espécie vegetal, a forma e o momento de aplicação do nutriente, bem como das interações com o ambiente e com hormônios vegetais, como a auxina.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do experimento

O experimento foi conduzido em área externa sob condições de pleno sol no Laboratório de Fisiologia Vegetal e Cultura de Tecidos da Universidade Federal de São Carlos – Centro de Ciências Agrárias (UFSCar-CCA), localizado no município de Araras, estado de São Paulo com início no mês de dezembro de 2024 e término em maio de 2025.

Mudas de acerola (*Malpighia emarginata*), da cultivar ‘Oliver’, foram previamente produzidas via estaquia caulinar para assegurar uniformidade genética. As estacas foram tratadas com ácido indolbutírico (AIB) na concentração de 2000 ppm por pincelamento e transplantadas em bandejas plásticas. Após seis meses de crescimento, as mudas foram transferidas para vasos com capacidade média de 6 L, permanecendo por igual período até o início da fase experimental.

Após esse período, as mudas foram cultivadas em caixas de isopor com capacidade média de 90 litros, devidamente perfuradas na parte inferior para garantir o escoamento do excesso de água (Imagem 1). O substrato foi composto por uma mistura de Carolina Soil®, fibra de coco (Agrolink®) e moinha de carvão, na proporção 2:2:1 (v:v:v). Em cada caixa foram incorporados 100 gramas do fertilizante de liberação controlada Basacote® PLUS 6M, que possui 0,49% de ferro (Fe) no total, dos quais 0,15% estão na forma solúvel em água. Com base nesse teor e considerando a liberação gradual ao longo de seis meses (conforme especificações do fabricante), estimou-se que, no período experimental de aproximadamente um mês, a quantidade efetiva de ferro disponível às plantas seria de aproximadamente 0,0245%. Esse valor foi adotado como dose base (tratamento controle), sem adição de quelato.

Para os demais tratamentos, as doses foram determinadas com base em multiplicações proporcionais dessa liberação inicial, simulando suplementações equivalentes ao dobro (0,049%) e triplo (0,0735%) da quantidade de ferro disponível no controle. Para isso, foi utilizada a aplicação complementar via fertirrigação de Fe-EDDHA a 6% (marca Agrodubo®), com o objetivo de avaliar os efeitos da suplementação sobre a fisiologia e a biofortificação da cultura. Além disso, em todas as unidades experimentais foi aplicada alga marinha Lithothamnium (Primaz®), como fonte adicional de cálcio e outros minerais.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3×2 , totalizando seis tratamentos, com quatro repetições cada (caixa de isopor 50 litros contendo uma planta de acerola em fase de produção de frutos). Os fatores estudados foram três concentrações de ferro (0,0245%, 0,049% e 0,0735%) e a aplicação ou não da auxina ácido naftalenoacético (ANA), na concentração de 10 mg/L.

A dose de auxina (ANA) foi determinada utilizando como referência os resultados de protocolo estabelecido por Garnica *et al.* (2018) com alterações, sendo realizadas quatro aplicações via fertirrigação de quinze em quinze dias. Já as aplicações de ferro foram realizadas semanalmente ao longo do período de 4 meses.

Salienta-se que apesar de o experimento ter se iniciado no mês de dezembro do ano de 2024, as aplicações de ferro e auxina e coletas de dados tiveram início ao final do mês de janeiro de 2025.

Figura 1 - Área de experimentação das mudas jovens de acerola (*Malpighia emarginata*), cultivadas em caixas de isopor com capacidade média de 90 litros.



Fonte: autoria própria.

4.2 Análises

4.2.1 Eficiência do fotossistema II e condutância estomática

As medições referentes à eficiência do fotossistema II foram realizadas utilizando o equipamento porômetro/fluorômetro LI-600 (LI-COR®), sob condições ambientais naturais

de cultivo. As coletas foram conduzidas quinzenalmente, sempre no intervalo das 10h30 às 12h00, visando garantir condições de elevada intensidade luminosa e estabilidade nas medições.

Para cada repetição dos tratamentos, foram selecionadas três folhas, localizadas a partir da quarta ramificação de galhos distintos, realizando-se a medição em um ponto na face adaxial de cada folha. Dessa forma, foram obtidas 72 medições por coleta (6 tratamentos \times 4 repetições \times 3 medições). No total, foram realizadas 8 coletas ao longo de 4 meses. As medições foram feitas diretamente em folhas expostas ao sol, sem pré-adaptação, registrando simultaneamente a (1) eficiência do fotossistema II (Φ PSII); (2) Temperatura foliar; (3) Taxa de transporte de elétrons (ETR) e (4) Condutância estomática ao vapor de água (gsw).

Para as análises realizadas a partir do fluorômetro/porômetro, a fim de analisar as variáveis relacionadas à fotossíntese e transpiração, foram obtidas médias referentes aos valores das variáveis de interesse. Após obter a média total para cada repetição dos tratamentos, os dados foram revisados a fim de verificar a sua normalidade.

Para as variáveis gsw e temperatura foliar, os pressupostos de normalidade ($p > 0,05$) e homogeneidade de variâncias ($p > 0,05$) foram atendidos, sendo analisadas por ANOVA fatorial 3×2 . Já para a variável ETR, houve violação de ambos os pressupostos ($p < 0,001$), sendo analisada pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis com 6 tratamentos combinados em DIC. A variável Φ PSII apresentou distribuição normal, mas violou a homogeneidade de variâncias ($p = 0,020$), sendo analisada também pelo teste de Kruskal-Wallis.

4.2.2 Teores de clorofila *a* e *b*

Os teores de clorofila *a* e *b* nas folhas das plantas foram determinados utilizando o equipamento portátil ClorofiLOG CFL 2060 (Falker®), sob condições naturais do ambiente. As coletas foram realizadas quinzenalmente, durante o período de 4 meses.

Em cada repetição dos tratamentos, foram realizadas duas medições em folhas distintas localizadas a partir da quarta ramificação contada do ápice em direção à base do ramo, totalizando 48 medições por coleta (6 tratamentos \times 4 repetições \times 2 medições). Para cada repetição, foi calculada a média, a fim de obter um valor representativo por unidade experimental.

No total, foram realizadas oito coletas ao longo do experimento, permitindo monitorar a variação dos teores de clorofila a e b sob influência dos diferentes tratamentos aplicados.

4.2.3 Determinação de sólidos solúveis

A determinação dos sólidos solúveis totais dos frutos foi realizada utilizando um refratômetro portátil, com base na escala de graus Brix. A análise foi conduzida em triplicata biológica para cada tratamento, sendo que, em cada repetição biológica, foram selecionados três frutos, totalizando nove frutos por tratamento (3 frutos por amostra \times 3 repetições biológicas).

Inicialmente, os frutos foram lavados em água corrente com a adição de uma gota de detergente neutro, a fim de remover impurezas e resíduos superficiais. Após o enxágue, foram secos com papel toalha para eliminar o excesso de água. Em seguida, os três frutos de cada amostra foram colocados em um almofariz com pistilo de vidro e macerados por aproximadamente dois minutos, visando extrair a maior quantidade possível de suco. O material macerado foi então transferido para um funil de vidro acoplado a um erlenmeyer de 25 mL, utilizando-se duas camadas de gaze dobradas como filtro, de modo a separar a fração líquida (suco) da fração sólida. Cada amostra resultou em média 10 mL de suco, volume que foi imediatamente utilizado para a leitura dos graus Brix (Figura 2)..

Figura 2 - Amostras em triplicata de suco de frutos de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA para determinação de Graus Brix a partir de refratômetro.



Fonte: autoria própria (2025).

4.2.4 Produtividade de frutos

Para a análise de produtividade, foram realizadas coletas em cada repetição dos diferentes tratamentos, conforme a demanda de produção de frutos, com o objetivo de quantificar a produção total de cada planta. Após a colheita, os frutos foram pesados em balança analítica de precisão e contabilizados individualmente (Figura 3). Ao final do experimento, os valores obtidos em cada coleta foram somados, resultando na quantidade total de frutos produzidos por repetição.

Figura 3 - Frutos de aceroleira (*Malpighia emarginata*) do tratamento de nível 3 de ferro sem auxina pesados em balança analítica de precisão.



Fonte: autoria própria (2025).

Para as análises de produtividade de frutos, os dados foram inicialmente submetidos ao teste de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$), para verificar a normalidade das variáveis, e ao teste de Levene ($p > 0,05$), para avaliar a homogeneidade de variâncias. Após essa verificação, e com o objetivo de uniformizar a distribuição dos dados, foi aplicada a transformação logarítmica $\log_{10}(x+1)$, sendo os testes de normalidade e homogeneidade reaplicados, confirmando a adequação dos dados aos pressupostos da análise de variância. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias de Scott-Knott a 5% de significância.

4.2.5 Colorimetria

A análise da coloração dos frutos foi realizada utilizando um espectrofotômetro CM (Konica Minolta®), operando no sistema de cor CIELAB, que expressa as cores em

coordenadas L^* , a^* e b^* . Foram selecionados três frutos por tratamento, os quais foram lavados em água corrente e em cada fruto foram realizadas três medições em pontos distintos do epicarpo, totalizando nove medições por tratamento. Posteriormente, os valores foram organizados para o cálculo da média, representando a coloração média de cada tratamento.

4.2.6 Micronutrientes e macronutrientes

Foram coletadas cinco unidades de folhas e frutos por repetição de cada tratamento ao final do experimento, visando compor uma amostra composta para as análises de macro e micronutrientes. Após a coleta, as amostras foram devidamente higienizadas e submetidas à secagem em estufa de circulação de ar forçado, a 60 °C, pelo período de três dias.

Posteriormente, as amostras foram encaminhadas ao Instituto Agrônomo de Campinas – Centro de Solos e Pesquisas de Fertilizantes, no Laboratório de Análise de Substratos, localizado na cidade de Campinas, São Paulo.

As análises para determinação dos teores totais de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn foram realizadas por meio de extração nítrico-perclórica, seguida de leitura em espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). O teor de nitrogênio total foi determinado pelo método de Kjeldahl (Association of Official Analytical Chemists, 1984).

4.2.7 Condutividade elétrica e pH

Foram coletadas amostras de substrato, sendo selecionada de forma aleatória uma repetição por tratamento, totalizando seis amostras distintas. Para compor uma amostra homogênea, as caixas foram abertas e diferentes porções de solo foram retiradas até atingir um total de 500 g. Em seguida, essas porções foram homogeneizadas por meio da mistura manual do substrato. Após essa etapa, adicionou-se água deionizada na proporção 1:1 (v/v), com posterior agitação e repouso por, em média, três horas, visando garantir a liberação dos íons presentes no solo (Figura 4).

Figura 4 - Preparação de amostras de solo para análises de condutividade elétrica e pH de mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*).



Fonte: autoria própria (2025).

Em sequência, utilizou-se uma peneira e um béquer para separar a fase líquida da sólida. Essa separação foi realizada duas vezes com o intuito de remover ao máximo o substrato retido na solução. Por fim, foram determinadas as variáveis de pH e condutividade elétrica da solução utilizando um condutivímetro portátil EC/TDS Groline (Hanna) e um pHmetro. Os valores obtidos foram planilhados e estudados a fim de complementar os resultados obtidos.

4.3 Análises estatísticas

Os dados obtidos em normalidade foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando-se o delineamento experimental em DIC e esquema fatorial 3×2 , totalizando seis tratamentos e quatro repetições. Em casos de não normalidade, houve a transformação de dados em função de $\log_{10}(x+1)$ e, quando necessário, aplicação de testes não paramétricos.

Foi utilizado o software JAMOVI versão 2.6.44 (The Jamovi Project, 2024) para testes de normalidade e dados não paramétricos e o software AgroStat (Barbosa; Maldonado Júnior, 2015) para leitura do teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade. Para as variáveis relacionadas aos frutos (análise de macro e micronutrientes, colorimetria e graus Brix), o tratamento correspondente à dose 0,0735% de ferro associado à presença de auxina foi desconsiderado da análise, devido à ausência de produção de frutos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Eficiência do fotossistema II e condutância estomática

Dentre as análises realizadas, não foram obtidos valores de variância significativa para as variáveis de ETR e eficiência de fotossistema II (Tabela 1). Para a variável gsw, houve uma tendência à significância na interação entre ferro x auxina, apresentando valor de $p=0,055$ (Tabela 2). Para averiguar esse resultado, foi gerada uma análise descritiva e um gráfico em box plots (Figura 5) pelo programa JAMOV.

Tabela 1 - Teste de Kruskal-Wallis para as variáveis ETR e eficiência de fotossistema II para as análises de fotossíntese foliar em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA. Dados não paramétricos.

Teste de Kruskal-Wallis para as variáveis de ETR e fotossistema II	
Variáveis	P-Valor
ETR	0,478
Fotossistema II	0,342

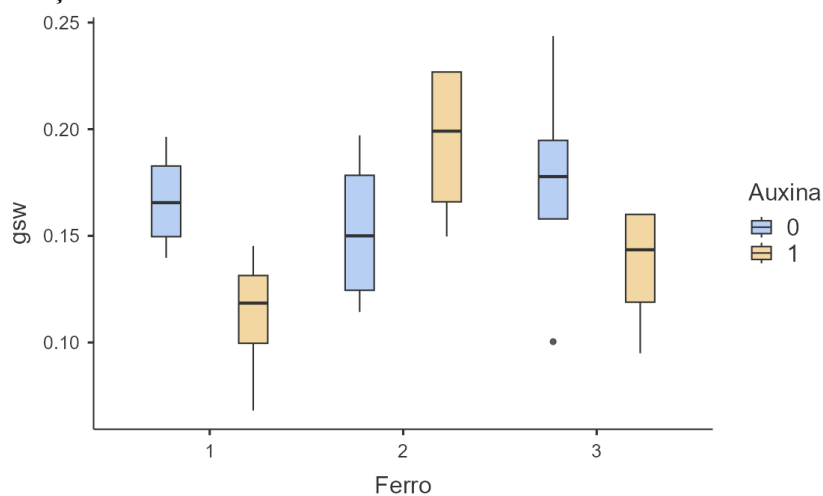
*Significância a 5% conforme teste de Kruskal-Wallis.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para as variáveis gsw e temperatura foliar em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para as variáveis de gsw e temperatura foliar		
Fonte de Variação	P-valor_gsw	P-valor_ temperatura foliar
Doses de ferro	0,2541	0,1541
Auxina	0,284	0,6261
Doses de ferro*auxina	0,0549	0,7742

*Significância a 5% conforme teste ANOVA.

Figura 5 - Boxplot para a variável de condutância estomática (gsw) em análises de condutância estomática em plantas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.



Autoria: JAMOVI.

Conforme os resultados obtidos, verificou-se que a aplicação de auxina afetou o desempenho de gsw de forma distinta a variar a dose de ferro aplicada. No segundo nível de ferro, a auxina promoveu um maior valor médio de gsw em comparação aos demais níveis (1 e 3). Além disso, a distribuição gráfica indica uma maior uniformidade de resultados das repetições do tratamento de Fe 2 + auxina, afirmando que a ativação de auxinas induz a abertura estomática a partir da extrusão de H⁺ a partir de H⁺ATPases presentes na membrana plasmática (Lohse; Hedrich, 1992).

5.2 Teores de clorofila a e b

Para as variáveis de teor de clorofila *a* e total não foram observadas diferenças estatísticas (Tabela 3 e 4). Para a variável teor de clorofila *b*, foram observadas diferenças estatisticamente significativas tanto para o efeito isolado das doses de auxina quanto para a interação entre as doses de ferro e a presença de auxina, conforme indicado pelos valores de $p = 0,0095$ e $p = 0,0129$, respectivamente (Tabela 5). Esses resultados demonstram que a resposta das plantas quanto ao acúmulo de clorofila *b* é sensível não apenas à presença de auxina, mas também à sua combinação com diferentes níveis de ferro.

Tabela 3 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila *a* em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para Clorofila a

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Valor de F	P-valor
Fator A (Doses de Ferro)	2	1,183808333	0,5919041667	0,13	0,8810
Fator B (Auxina)	1	0,2730666667	0,2730666667	0,06	0,8111
Interação A × B	2	3,256108333	1,628054167	0,35	0,7088

*Significância a 5% no teste de ANOVA

Tabela 4 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila total em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para Clorofila total					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Valor de F	P-valor
Fator A (Doses de Ferro)	2	2,207925	1,1039625	0,2	0,8209
Fator B (Auxina)	1	11,7180375	11,7180375	2,12	0,1627
Interação A × B	2	17,768775	8,8843875	1,61	0,2218

*Significância a 5% no teste de ANOVA.

Tabela 5 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável clorofila *b* em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para Clorofila b					
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	Valor de F	P-valor
Doses de Ferro	2	1,2692	0,6346	0,63	0,5418
Auxina	1	8,4135	8,4135	8,41	0,0095
Doses de ferro*auxina	2	11,1996	5,5998	5,6	0,0129

* Significância a 5% conforme teste ANOVA.

Ao se analisar os tratamentos de forma combinada, verificou-se que o tratamento com a maior dose de ferro sem a presença de auxina resultou no maior teor de clorofila *b*, representando um aumento de 20,82% em relação ao controle. Em seguida, destaca-se o tratamento com dose intermediária de ferro sem auxina, com aumento de 9,93%, e o tratamento com menor dose de ferro com auxina, com aumento de 8,15% em relação ao controle (Tabela 6).

Tabela 6 - Teores de clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA. Índice de clorofila Falker (IFC).

Teores de clorofila entre os tratamentos				
Doses de Ferro (%)	Doses de Auxina (mg/L)	Teor de clorofila a	Teor de clorofila b	Teor de clorofila total

0,0245%	0	33,46 a	8,56 a	42,03 a
	10	33,76 a	9,26 a	43,02 a
0,049%	0	33,87 a	9,41 a	43,28 a
	10	32,61 a	7,67 b	40,28 a
0,0735%	0	32,92 a	10,35 a	43,26 a
	10	33,24 a	7,84 b	41,08 a
p		0,881	<0,05	0,1627

* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

Por outro lado, os tratamentos com as doses de ferro 2x e 3x, na presença de auxina apresentaram os menores valores médios de clorofila b, com reduções de 10,45% e 8,44%, respectivamente, em relação ao controle. Esses dados indicam que a presença de auxina, principalmente nas doses mais elevadas de ferro, inibiu a síntese ou estabilidade da clorofila b nas plantas avaliadas. Embora o ferro em doses mais altas favorecem o acúmulo de clorofila b, a interação com a auxina modifica significativamente essa resposta. Tais resultados ressaltam a importância de considerar os efeitos combinados entre nutrientes e fitorreguladores no manejo fisiológico das culturas, especialmente quando o objetivo é otimizar a fotossíntese e o acúmulo de pigmentos.

Estudos realizados com *Arabidopsis thaliana* evidenciaram que a sinalização via auxina inibe a expressão de genes-chave como *PORA*, *GUN5* e *HEMA1*, fundamentais na síntese de clorofila, por meio da ação do complexo proteico ARF7-IAA14, resultando em redução do acúmulo de clorofila b nas folhas (Luo *et al.*, 2023). Além disso, a auxina pode atuar como moduladora negativa da biogênese de cloroplastos, comprometendo a organização interna dos tilacóides e, conseqüentemente, a eficiência fotossintética (Salazar-Iribe; De-La-Peña, 2020). Tais evidências corroboram os resultados obtidos nesse projeto, no qual a presença de auxina, associada a doses elevadas de ferro, promoveu reduções de até 10,45% no teor de clorofila b, quando comparado ao controle. Assim, é possível observar que, além de suas funções já conhecidas, a auxina também exerce papel inibitório sobre a via de biossíntese de pigmentos fotossintéticos, afetando diretamente o desempenho metabólico e fisiológico das plantas.

5.3 Determinação de sólidos solúveis

O experimento foi originalmente delineado em esquema fatorial 3×2. Contudo, devido à ausência de produção de frutos no tratamento com maior dose de ferro e aplicação de auxina, não foi possível realizar a análise estatística no modelo fatorial completo. Dessa forma, os dados foram reclassificados e analisados como cinco tratamentos independentes, correspondentes às combinações que apresentaram amostras viáveis. Essa decisão foi tomada considerando a impossibilidade de transformação dos dados ausentes em valores do tipo NA, sem comprometer a estrutura e a integridade da matriz experimental.

A análise de variância foi conduzida para verificar possíveis diferenças entre as médias dos tratamentos, não havendo diferença estatística significativa para a variável °Brix entre os tratamentos avaliados (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para a variável teor de sólidos solúveis em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para sólidos solúveis	
Fonte de Variação	P-valor_ °Brix
Tratamento	0,4646
Repetição	0,1424

* Significância a 5% no teste de Skott Knott.

Apesar disso, avaliando as médias referentes aos teores de sólidos solúveis totais, observou-se que o tratamento com a maior dose de ferro (0,0735%) apresentou valores semelhantes ao controle (Tabela 8). Esse resultado indica que, na ausência de auxina, a aplicação de ferro em alta concentração pode ter favorecido o acúmulo de açúcares nos frutos, refletindo um possível avanço na maturação. Resultados semelhantes foram descritos por Duralija et al. (2021), que verificaram aumento significativo na concentração de açúcares em frutos de morango da cultivar ‘Joly’ submetidos à aplicação foliar de solução de Fe-EDDHA, em comparação àqueles que não receberam o tratamento. Em contraste, quando a auxina estava presente, a concentração de açúcares foi reduzida, evidenciando a interação entre o micronutriente e o fitorregulador no controle do desenvolvimento e das características químicas dos frutos.

Tabela 8 - Teores de sólidos solúveis em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Teores de sólidos solúveis entre os tratamentos		
Doses de Ferro (%)	Doses de Auxina (mg/L)	°Brix
0,0245%	0	10,3333 a
	10	9,76666 a
0,049%	0	9,8333 a
	10	9,4666 a
0,0735%	0	10,6333 a
	10	-
p		>0,05

* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

5.4 Produtividade de frutos

Os resultados obtidos evidenciaram interação significativa entre os fatores (doses de ferro × auxina) para ambas as variáveis analisadas (Tabela 9), indicando que a associação entre as doses de ferro e auxina influenciou diretamente a produtividade de frutos.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3x2) para as variáveis peso e número de frutos em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para as variáveis peso e número de frutos		
Fonte de Variação	P-valor peso	P-valor nº de frutos
Doses de ferro	0,9115	0,8978
Auxina	0,3802	0,4079
Doses de ferro*auxina	0,0079	0,0084
CV	70,95%	71,96%

Significância a 5% conforme teste ANOVA.

A partir do desdobramento da interação e da comparação de médias, observou-se que o tratamento com a maior dose de ferro, quando combinado à aplicação de auxina, resultou em uma redução drástica de aproximadamente 90% nas médias de ambas as variáveis em relação ao controle. Por outro lado, a mesma dose de ferro, sem a presença de auxina, embora não tenha apresentado diferença estatisticamente significativa, demonstrou uma tendência de aumento médio de 60% na produtividade, sugerindo que a auxina pode ter exercido efeito inibitório sobre a formação de frutos (Tabela 10).

Tabela 10 - Determinação de médias para as variáveis peso e número de frutos de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA produzidos ao longo do experimento.

Média de produtividade entre os tratamentos (Kg/planta)			
Doses de Ferro (%)	Doses de Auxina (mg/L)	Peso (g)	Nº de frutos
0,0245%	0	93,62 a	37 a
	10	60,01 a	24 a
0,049%	0	37,57 a	11 a
	10	153,35 a	70 a
0,0735%	0	186,29 a	73 a
	10	1,26 b	1 b
p		<0,05	<0,05

* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

Essa diferença acentuada, ainda que não significativa em todos os contrastes, pode ser atribuída ao elevado coeficiente de variação (CV%), que ultrapassou 70% nas duas variáveis analisadas. Tais valores refletem baixa homogeneidade nos dados, provavelmente decorrente da ocorrência de valores nulos (“zero”) em algumas repetições, ou seja, ausência de produção de frutos. Essa alta variabilidade compromete a precisão dos testes estatísticos, dificultando a detecção de diferenças reais entre os tratamentos.

Embora as auxinas sejam reconhecidas por estimular processos fisiológicos como a divisão celular e o desenvolvimento de frutos, doses elevadas podem desencadear efeitos adversos, como bloqueio da dominância apical, aumento na produção de etileno, estresse oxidativo e até mesmo fitotoxicidade (Barbosa *et al.*, 2023; Dias *et al.*, 2020). Em estudo com a cultura da soja, Barbosa *et al.* (2023) demonstraram que o uso de bioestimulantes contendo auxinas ocasionou redução no número de vagens, menor altura das plantas e queda no rendimento, principalmente quando utilizados em concentrações acima das recomendadas. Além disso, estudos realizados em plantas de *Citrus*, demonstram que existe uma possível atuação da auxina como um sinal inibitório da floração, especialmente em plantas com alta carga de frutos. Conforme Marzal *et al.* (2025), o ácido indolacético (IAA) produzido pelos frutos é transportado via floema até as gemas, onde se acumula e reprime genes-chave como CiFT3 e LFY, impedindo a diferenciação floral. Assim, os meristemas permanecem vegetativos, reduzindo a formação de flores e contribuindo para uma alternância de produção.

Esses dados reforçam os resultados deste estudo, sugerindo que a auxina aplicada no tratamento com maior dose de ferro, possivelmente em concentração inadequada ou em interação desfavorável com o ferro em aceroleiras, comprometeu diretamente a formação e o desenvolvimento dos frutos, resultando em médias produtivas até 90% inferiores ao controle.

Dessa forma, torna-se evidente a importância de avaliar cuidadosamente as doses e combinações de reguladores vegetais no manejo da cultura, a fim de evitar efeitos indesejáveis sobre a produtividade e a padronização de colheitas.

5.5 Colorimetria

Para as análises de colorimetria, foram analisadas como variáveis as coordenadas cromáticas de luminosidade (L^*); coordenada vermelho/verde (a^*) e coordenada amarelo / azul (b^*). Devido à falta de produção de frutos para o nível 3 de ferro + auxina, não obtiveram dados para representação de colorimetria nesse tratamento, sendo reconhecidos como NA (dados ausentes).

A análise de variância fatorial (3×2) revelou interação significativa entre as doses de ferro e a aplicação de auxina sobre a variável b^* ($p = 0,0452$) (Tabela 11). Esse resultado indica que a coloração dos frutos foi influenciada de forma conjunta pelos dois fatores, ou seja, o efeito de uma variável depende da presença ou ausência da outra. Isso sugere um efeito integrado entre a nutrição mineral e a regulação hormonal na determinação da cor dos frutos, característica intimamente ligada à maturação, à degradação de pigmentos verdes e ao acúmulo de carotenóides (Taiz *et al.*, 2015).

Tabela 11 - Resumo da análise de variância em esquema fatorial (3×2) para as variáveis de colorimetria seguindo o espaço de cor L^* a^* b^* em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Análise de variância para colorimetria			
Fonte de Variação	P-valor _ L^*	P-valor _ a^*	P-valor _ b^*
Doses de ferro	0,2777	0,8602	0,9209
Auxina	0,0937	0,7874	0,8495
Doses de ferro*auxina	0,6435	0,0588	0,0452

* Significância a 5% conforme teste ANOVA.

Ao realizar o desdobramento da interação (Tabela 12), não houve diferença significativa para as fontes de variação, porém, houve a apresentação de valores a serem considerados para o fator ferro dentro dos níveis de auxina, indicando uma tendência à significância.

Tabela 12 - Resumo do desdobramento de ferro dentro dos níveis de auxina para a variável b* em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Desdobramento de ferro dentro dos níveis de auxina para b*	
Fonte de Variação	P-valor_ b
Doses de ferro	0,08231
Auxina	0,0732
Doses de ferro*auxina	0,1134

*Significância a 5% conforme teste ANOVA.

Ao analisar as médias obtidas, observou-se um comportamento cruzado entre os valores (Tabela 13). Na ausência de auxina, o aumento da dose de ferro (0,049%) promoveu um aumento de em média 73% nos valores de b*, indicando uma tendência à coloração amarelada, podendo estar relacionado ao avanço do amadurecimento e à degradação de clorofila, com acúmulo de carotenóides. Em contraste, na presença de auxina, a mesma dosagem de ferro reduziu os valores de b* de 12,08 para 7,38, representando uma diminuição de cerca de 39%, sugerindo uma manutenção da coloração verde e um retardamento relativo do processo de senescência. Esses resultados evidenciam que a auxina pode retardar o amadurecimento dos frutos, interferindo na mudança de cor típica do processo (McAtee *et al.*, 2013). Além disso, os dados indicam uma possível relação entre ferro e maturação de frutos climatéricos, já que o ferro participa de uma coordenação complexa envolvendo ROS, NO e sinais hormonais, como o etileno, regulando o desenvolvimento e a maturação dos frutos (Shakya *et al.*, 2020).

Tabela 13 - Médias de valores representativos do eixo b* seguindo o padrão de leitura de cor CIELAB em mudas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Valores representativos para o eixo b* em acerolas		
Doses de Ferro (g/L)	Doses de Auxina (mg/L)	Variável b*

0,0245%	0	7,44 a
	10	12,08 a
0,049%	0	12,88 a
	10	7,38 a
p		>0,05

* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

De acordo com Lemoine et al. (2016) e Yang et al. (2022), tendências estatísticas em experimentos biológicos indicam a possibilidade de efeitos reais, especialmente em condições de menor número de repetições, sendo muitas vezes confirmadas em estudos subsequentes com maior poder experimental, o que pode ser sugerido a esse experimento. Portanto, mesmo na ausência de significância estatística estrita nos desdobramentos, os resultados obtidos são cientificamente relevantes e indicam um caminho promissor para futuros estudos que visem o manejo da qualidade dos frutos.

5.6 Micronutrientes e macronutrientes

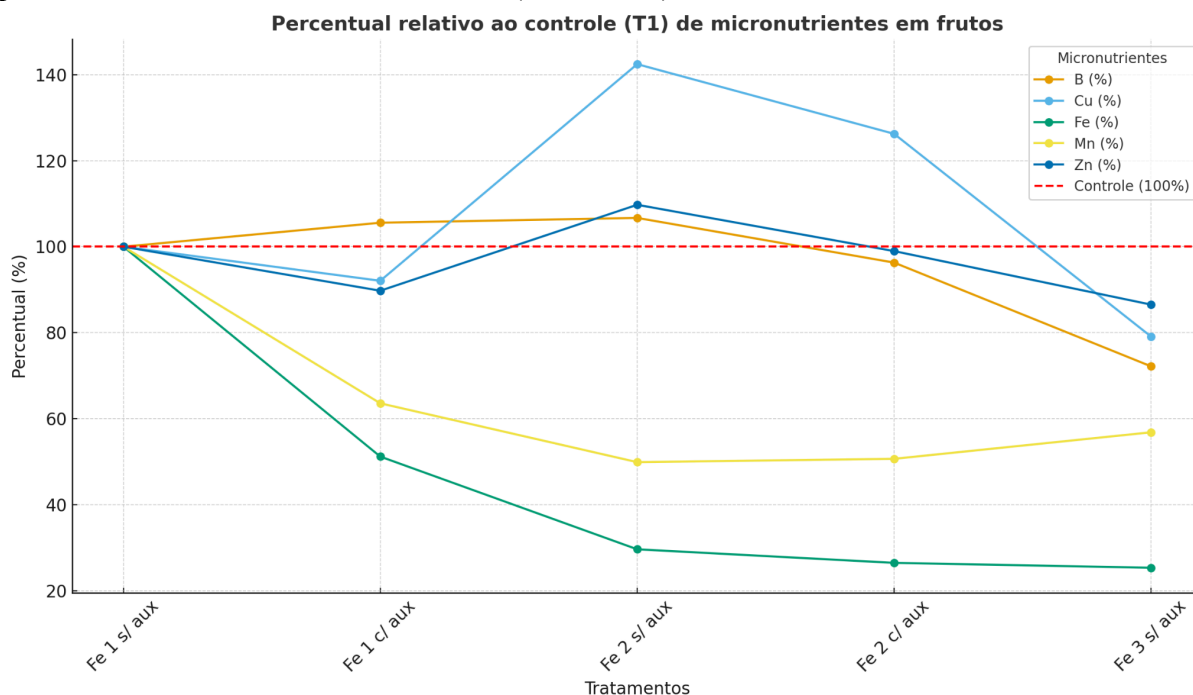
As análises dos dados foram expressas como percentuais relativos ao tratamento controle (Fe 1 s/ aux), sendo atribuído seu valor como 100%, a fim de obter parâmetros mais visíveis e de melhor compreensão acerca das variações observadas referentes a absorção de elementos em função dos diferentes tratamentos com ferro e auxina. Por ser uma amostra composta, não foram feitos testes estatísticos, mas houve diferenças percentuais que evidenciam certos padrões relevantes a serem observados. A fim de tornar os resultados mais claros e visuais, gráficos de linha foram construídos para a análise dos percentuais referentes aos micronutrientes e macronutrientes em frutos e folhas.

Dentre os micronutrientes, o elemento ferro (Fe) se destaca por ser o foco central deste estudo, dada sua importância na síntese de clorofila, respiração e metabolismo de enzimas, além de sua atuação direta na divisão celular e na formação dos frutos (Marschner, 2012).

Observou-se que o tratamento controle (Fe 1 s/ auxina) apresentou o maior acúmulo de ferro nos frutos, servindo como referência (100%) para os demais (Figura 6). A adição de auxina nessa mesma dose de ferro reduziu o percentual para 51,23%, seguindo uma tendência de diminuição conforme aumentaram as doses de ferro, com valores de 29,69% e 25,40%, respectivamente. Esses resultados indicam que, à medida que a dose de ferro aumentou,

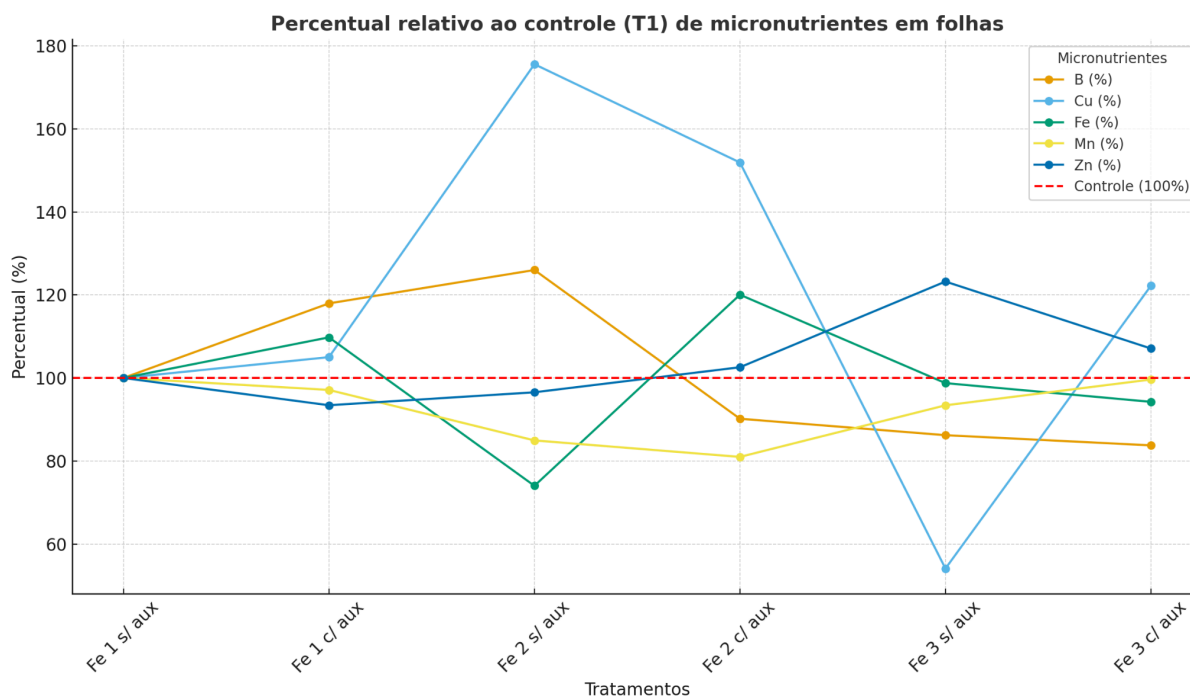
houve redução drástica no acúmulo do nutriente nos tecidos dos frutos, especialmente quando associado à auxina, sugerindo um efeito antagônico entre os dois fatores.

Figura 6 - Determinação de micronutrientes em frutos de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.



Nas folhas, o comportamento foi distinto. Observou-se um aumento de 9,78% em relação ao controle no tratamento com menor dose de ferro, mas com a presença de auxina, revelando uma possível estimulação no acúmulo de ferro nas folhas pela auxina. Nos demais tratamentos, os valores foram ligeiramente inferiores ao controle (Figura 7), o que evidencia que o aumento das doses de ferro pode ter inibido parcialmente o acúmulo do nutriente (Epstein; Bloom, 2006).

Figura 7 - Determinação de micronutrientes em folhas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.



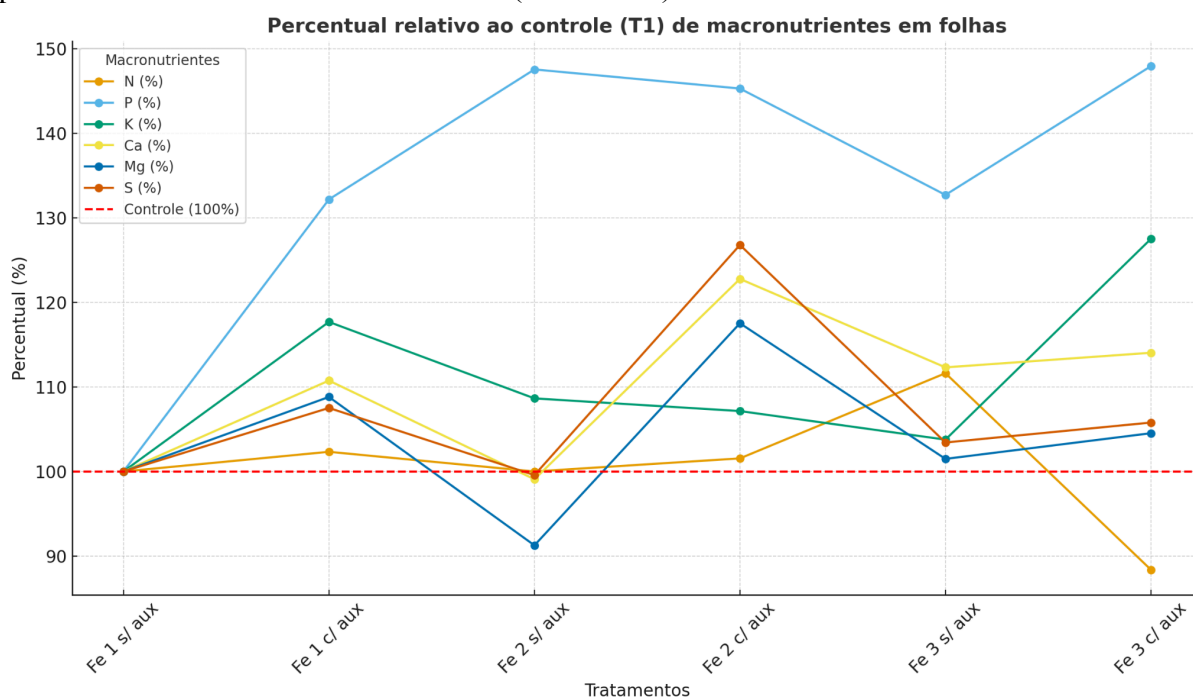
Também foi observada a redução nos níveis de manganês (Mn) nas folhas e frutos, em comparação ao seu acúmulo no tratamento controle. Segundo Moosavi e Ronaghi (2011), a aplicação de altos níveis de ferro via solo pode acarretar uma menor absorção de manganês, evidenciando uma relação antagônica entre esses elementos durante os processos de absorção e translocação pelas raízes. Os autores também destacam que, em aplicações foliares com o quelato de ferro (EDDHA), não foram observadas reduções significativas nos teores de Mn, sugerindo que a forma de aplicação do ferro influencia diretamente essa interação nutricional. Dessa forma, recomenda-se realizar ensaios comparativos com diferentes formas de fertilização (foliar e via solo), com o objetivo de identificar possíveis diferenças no comportamento dos nutrientes e otimizar sua disponibilidade para a planta.

Apesar disso, destaca-se o aumento nos teores de outros micronutrientes nos frutos, como cobre (Cu) em 42,42%, zinco (Zn) em 9,74% e boro (B) em 6,69%, observado no tratamento com a segunda dose de ferro sem a presença de auxina, o que evidencia um possível efeito positivo dessa combinação sobre o acúmulo destes micronutrientes nos frutos.

Já para o tratamento com maior dose de ferro, os valores dos micronutrientes em geral obtiveram uma queda significativa no acúmulo nos frutos.

Para os valores de macronutrientes em folhas (Figura 8), o tratamento contendo a segunda dose de ferro com a presença de auxina (Fe 2 + aux) obteve um aumento de todos os macronutrientes em relação ao controle, principalmente na concentração de Fósforo (P), Enxofre (S), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), com aumento de 45,32%, 26,81%, 22,79% e 17,54%, respectivamente. O tratamento de menor dose de ferro com a presença de auxina também obteve resultados maiores que o controle, dando ênfase ao aumento de P, K e S. Tal resultado sugere que a presença do fitorregulador ANA potencializou a absorção radicular e transporte desses nutrientes para as folhas em associação a menores doses de ferro quando comparado aos demais tratamentos, reforçando que a auxina favorece a absorção de nutrientes móveis como fósforo e potássio (Taiz *et al.*, 2015).

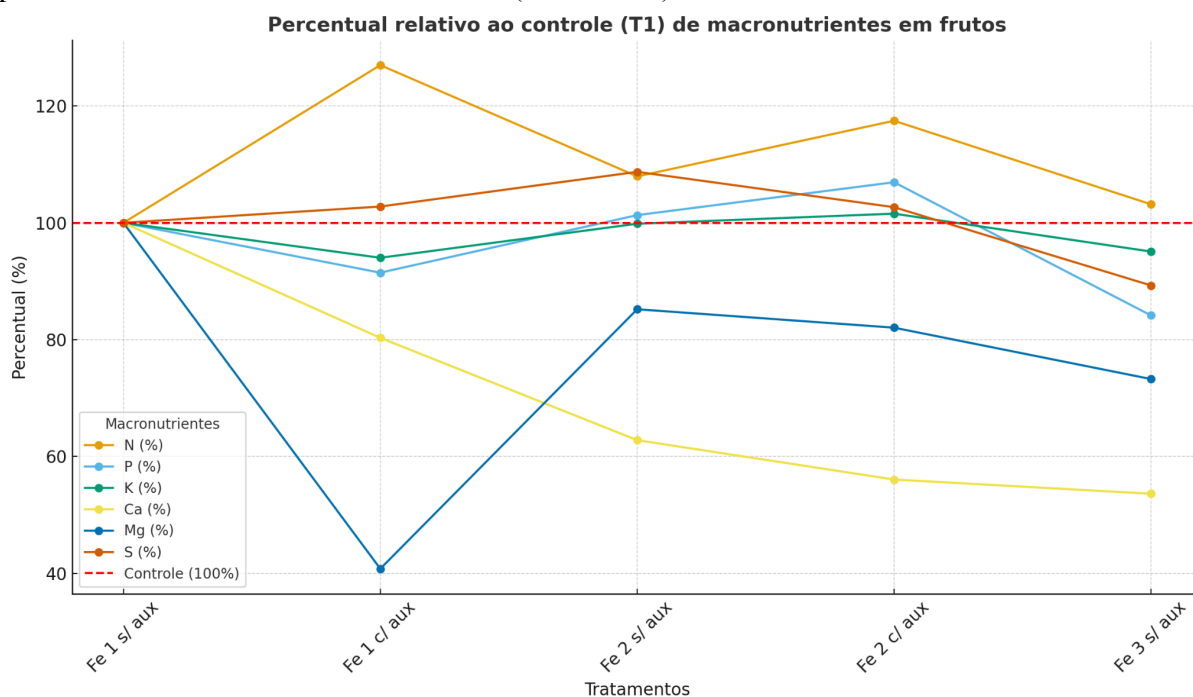
Figura 8 - Determinação de macronutrientes em folhas de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.



Já em relação aos frutos (Figura 9), os resultados de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no tratamento Fe 2 + aux demonstraram reduções acentuadas de 37,20% e 14,80%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. A redução dos teores de cálcio (Ca)

e magnésio (Mg) observada em todos os tratamentos sugere que o aumento na concentração de ferro pode comprometer a absorção desses macronutrientes nos frutos. Esse efeito pode estar relacionado a desequilíbrios nutricionais induzidos pelo excesso de ferro, que, segundo Audebert e Fofana (2009), pode causar deficiências de minerais essenciais como fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e zinco (Zn). Para os demais nutrientes, não houve mudanças tão relevantes em relação ao controle.

Figura 9 - Determinação de macronutrientes em frutos de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA em valores percentuais como ponto de referência tratamento controle (Fe 1 s/ aux) a 100%.



5.7 Condutividade elétrica e pH

Para complementar as análises referentes ao presente estudo e os resultados gerados, a realização das análises de determinação de condutividade elétrica (C.E) e pH foram essenciais para uma melhor compreensão acerca dos resultados obtidos no decorrer das análises estatísticas geradas, principalmente ao que se diz respeito a diminuição do acúmulo de ferro pelos frutos conforme o aumento de níveis desse fator e a presença de auxina (Tabela 14).

Tabela 14 - Determinação de condutividade elétrica e pH nas amostras de solo de aceroleira (*Malpighia emarginata*) sob diferentes doses de ferro e a presença e ausência de ANA.

Determinação de condutividade elétrica e pH		
Tratamentos	C.E (dS/m)	pH
Fe 1 s/ aux	0,08	7,06
Fe 1 + aux	0,34	6,22
Fe 2 s/ aux	0,08	6,9
Fe 2 + aux	0,33	6,33
Fe 3 s/ aux	0,42	6,39
Fe 3 + aux	0,23	6,29

Autoria própria.

A análise do solo indicou que os tratamentos com aplicação de auxina apresentaram, em geral, pH mais ácido e maior condutividade elétrica. Por exemplo, o tratamento controle (Fe 1 s/ auxina) apresentou pH de 7,06 e C.E. de 0,08 dS/m. Já o mesmo nível de ferro com auxina (Fe 1 + auxina) apresentou pH de 6,22 e C.E. de 0,34 dS/m. Esse padrão se repetiu nos demais níveis, mostrando que a auxina contribuiu para a acidificação do solo e aumento da salinidade, possivelmente em decorrência da maior atividade radicular estimulada e da liberação de íons pelas raízes. A relação entre a presença de auxina e a acidificação do solo pode ser compreendida de forma indireta, uma vez que a auxina estimula o desenvolvimento e a diferenciação das raízes das plantas (Overvoorde *et al.*, 2010). Como consequência, ocorre a liberação de prótons (H^+) do meio intracelular para o extracelular, o que aumenta a concentração de íons na solução do solo (Paulilo; Viana; Randi, 2015). Dessa forma, o aumento dos níveis de auxina e, conseqüentemente, a maior liberação de íons podem se tornar uma possível explicação para a redução do pH observada nos tratamentos com aplicação de ANA.

Sabe-se que o pH da solução líquida do solo influencia diretamente a solubilidade dos minerais, afetando, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes para as plantas (Cardoso; Andreote, 2016). No caso do ferro, sua disponibilidade depende das condições químicas do solo, incluindo a presença de sais e íons específicos. Em solos ácidos, com pH em torno de 5,0, a solubilidade do ferro tende a aumentar, favorecendo sua absorção. Por outro lado, em solos com pH superior a 6,5, o ferro passa a ser encontrado

predominantemente em formas insolúveis, o que reduz sua disponibilidade para as plantas (Ning *et al.*, 2021).

Apesar disso, Barrow e Hartemink (2023) destacam a complexidade de relacionar pH, solo e nutrição vegetal: o pH altera, simultaneamente, a solubilidade, a especiação iônica, a concentração em solução, a adsorção nos colóides e a mobilidade dos nutrientes, e os efeitos resultantes variam conforme o tipo de solo e a espécie cultivada. Diante desse contexto, os resultados apresentados indicam que, embora os tratamentos com auxina tenham acidificado o sistema, não houve aumento do teor de Fe em folhas e frutos, ao contrário, observou-se uma redução. Isso sugere que fatores além do pH em amostra homogeneizada podem ter limitado a disponibilidade efetiva de certos nutrientes, em destaque o ferro. Assim, recomenda-se incorporar medições específicas de pH da rizosfera, bem como indicadores da solução do solo, para interpretar adequadamente a absorção e o transporte de Fe.

Tais pontos são importantes para serem observados, pois o aumento das doses de ferro não garante seu incremento nos tecidos vegetais e seu acúmulo nos frutos, como foi evidenciado no presente estudo. Essa incongruência também pode ser interpretada como uma das possíveis causas de efeito de saturação ou toxicidade, no qual o excesso de ferro no solo ultrapassa a capacidade de absorção das raízes ou desencadeia respostas fisiológicas que inibem seu acúmulo nos tecidos reprodutivos. Segundo Morrissey e Guerinot (2010), as plantas possuem mecanismos regulatórios que limitam a absorção de ferro em situações de excesso, como a redução da expressão de transportadores específicos e a ativação de sistemas de defesa. Esses ajustes fisiológicos, embora protetores, podem restringir o transporte de ferro para os órgãos comestíveis, afetando não apenas a produtividade das culturas, mas também a qualidade nutricional dos frutos.

Assim, os dados de pH e condutividade elétrica do solo se mostram determinantes para a interpretação da baixa concentração de ferro nos frutos, mesmo com o aumento de sua aplicação. Esses fatores reforçam a necessidade de compreender a interação entre a fertilização, os reguladores vegetais e o ambiente edáfico, visando a otimização da absorção e da translocação de nutrientes em culturas frutíferas.

Um dado importante a ser analisado também é a diferença entre as concentrações de ferro em frutos e folhas nas plantas de acerola. Apesar da baixa concentração de ferro nos frutos, nas análises de micronutrientes em folhas observou-se que a presença de ferro indicou

uma leve alteração em relação ao controle, sugerindo que a translocação de ferro nos tecidos da planta ocorreu de maneira distinta. Uma hipótese a ser levantada é o comprometimento da ligação do ferro à ferritina, proteína responsável pelo armazenamento e transporte deste nutriente nas plantas. A ferritina desempenha um papel essencial no armazenamento intracelular de ferro e está presente, principalmente, em plastídeos não fotossintéticos, como os cromoplastos, caracterizados por seu alto teor de carotenóides e tipicamente encontrados em flores e frutos (Yang *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2010; Sadali *et al.*, 2019). Assim, futuros estudos para avaliação da expressão gênica de ferritina, como *FER1*, *IRT1*, *YSL*, entre outros envolvidos no transporte e armazenamento de ferro em folhas e frutos se tornam relevantes para um melhor entendimento acerca dos fenômenos apresentados no estudo.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que, nas condições deste estudo, o aumento das doses de ferro, especialmente quando associado à aplicação de auxina, não resultou em maior acúmulo do nutriente na cultura da acerola. As diferenças de concentração entre frutos e folhas sugerem possível ligação do ferro à ferritina nos cromoplastos dos frutos, o que merece atenção em futuros estudos sobre translocação. Além disso, a aplicação de auxina, especialmente associada à maior dose de ferro, teve efeito negativo na formação e no desenvolvimento dos frutos de aceroleira, reduzindo drasticamente a produtividade e sugerindo que o fitorregulador possa atuar na inibição de floração de acerolas. Também são fundamentais investigações mais detalhadas acerca do pH da solução do solo e da absorção de ferro pela planta, para elucidar os mecanismos que envolvem a nutrição da cultura.

Diante dos resultados, recomenda-se ampliar o número de repetições, estabelecer um gradiente mais fino de doses dentro das faixas de Nível 1 e Nível 2 testadas, comparar diferentes tipos de adubação para identificar sistemas mais eficientes e adotar delineamento em blocos, a fim de melhor isolar efeitos ambientais externos. Também indica-se estudos mais aprimorados voltados para a atuação da auxina no florescimento da espécie e, conseqüentemente, na produção de frutos.

Assim, o estudo oferece contribuições relevantes para o avanço do conhecimento sobre absorção e transporte de ferro e sua relação com a auxina (ANA) na modulação de características fisiológicas das plantas, sendo uma área ainda pouco explorada nas pesquisas agrônômica e aponta para a necessidade de investigações mais aprofundadas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGETHAMI, J. S.; IRSHAD, M. K.; JAVED, W.; ALHAMAMI, M. A. M.; IBRAHIM, M. Iron-modified biochar improves plant physiology, soil nutritional status and mitigates Pb and Cd-hazard in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 14, ago. 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1221434/full>. Acesso em: 06 jul. 2025.
- ALEXANDRE, J. R.; OLIVEIRA, M. L. F.; SANTOS, T. C. dos; CANTON, G. C.; CONCEIÇÃO, J. M. da; EUTRÓPIO, F. J.; CRUZ, Z. M. A.; DOBBS, L. B.; RAMOS, A. C. Zinco e ferro: de micronutrientes a contaminantes do solo. **Natureza Online**, v. 10, n. 1, p. 23–28, jan./mar. 2012. Disponível em: <https://naturezaonline.com.br/revista/article/view/289/268>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- ANDRADE-SIFUENTES, A.; GAUCIN-DELGADO, J. M.; FORTIS-HERNANDEZ, M.; RODRIGUEZ-CAMPOS, J.; MENDOZA-ESPINOSA, L. G.; VALDEZ-AGUILAR, L. A. Iodine biofortification improves yield and bioactive compounds in melon fruits. **Horticultura Brasileira**, v. 42, e275325, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/87RWtbSkfMD6mggd7CNkcQz/>. Acesso em: 01 jul. 2025.
- ARCAS, A.; LÓPEZ-RAYO, S.; GÁRATE, A.; LUCENA, J. J. A Critical review of methodologies for evaluating iron fertilizers based on iron reduction and uptake by strategy I plants. **Plants**, v. 13, n. 6, p. 819, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/6/819>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, n. 2, p. 371–375, 1939. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC437744/>. Acesso em: 13 jun. 2025.
- ASSIS, S. A. de; LIMA, D. C.; OLIVEIRA, O. M. M. de F. Atividade da pectinametilsterase, teor de pectina e vitamina C em frutos de acerola em vários estágios de desenvolvimento do fruto. **Food Chemistry**, v. 74, n. 2, p. 133-137, ago. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814601001042?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical chemists. 14. ed. Washington, 1984.
- AUDEBERT, A.; FOFANA, M. Rice yield gap due to iron toxicity in West Africa. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 195, p. 66–76, 2009. Disponível em: https://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=548369. Acesso em: 15 jun. 2025.
- AUDEBERT, A., SAHRAWAT, K. L. Mecanismos de tolerância à toxicidade de ferro em arroz de várzea. **Journal of Plant Nutrition**, v. 23, n. 11/12, p. 1877–1885, 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904160009382150>. Acesso em: 15 jun. 2025.

BARBOSA, A. S.; PELÚZIO, J. M.; FIDELIS, R. R.; FERREIRA JÚNIOR, O. J.; SANTOS, W. F. dos. Efeitos de reguladores vegetais nas características agronômicas de soja cultivada em baixa latitude. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 1, p. 1-19, 17 fev. 2023. Disponível em:

<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/download/9862/7261>. Acesso em: 02 jul. 2025.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação Agronômica & AgroEstat: Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos**. Versão 1.1. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/321245304_Experimentacao_Agronomica_AgroEst_at_Sistema_para_Analises_Estatisticas_de_Ensaio_Agronomicos. Acesso em: 04 jul. 2025.

BARROW, N. J.; HARTEMINK, A. E. Os efeitos do pH na disponibilidade de nutrientes dependem tanto do solo quanto das plantas. **Plant Soil**, v. 487, p. 21–37, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>. Acesso em: 27 ago. 2025.

BORBA, L. de S.; LIMA, L. B. de; SILVA, G. V. da; SALLES, S. W. E.; BANDEIRA, A. R. G.; LIMA, S. H. P. de. A importância do ferro no organismo humano: uma revisão integrativa da literatura. **Research, Society And Development**, v. 11, n. 17, p. 1-11, 23 dez. 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/38965>. Acesso em: 6 jun. 2025.

BARGMANN, B. O. R.; VANNESTE, S.; KROUK, G.; NAWY, T.; EFRONI, I.; SHANI, E.; CHOE, G.; FRIML, J.; BERGMANN, D. C.; ESTELLE, M.; BIRNBAUM, K. D. A map of cell type-specific auxin responses. **Molecular Systems Biology**, v. 9, art. 688, 2013. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3792342/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Caderno dos Programas Nacionais de Suplementação de Micronutrientes**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2022. 47 p. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/caderno_programas_nacionais_suplementacao_micronutrientes.pdf. Acesso em: 19 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Política Nacional de Alimentação e Nutrição (PNAN)**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2013. 86 p. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_nacional_alimentacao_nutricao.pdf. Acesso em: 19 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 31, de 13 de janeiro de 1998**. Regulamento Técnico Para Fixação de Identidade e Qualidade de Alimentos Adicionados de Nutrientes Essenciais. Seção 1-E, p. 1. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/1998/anexo/anexo_prt0031_13_01_1998.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Prevenção e controle de agravos nutricionais**. [S.l.]: [s.n.], [20--]. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/saps/nutrisus>. Acesso em: 1 jun. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde (org.). **Situação alimentar e nutricional no Brasil: excesso de peso e obesidade da população adulta na Atenção Primária à Saúde**. Brasília, DF, 2020. 17 p. Disponível em:

https://bvsmis.saude.gov.br/bvsmis/publicacoes/atlas_situacao_alimentar_nutricional_populacao_adulta.pdf. Acesso em: 1 jun. 2024.

CAKMAK, I. Enriquecimento de grãos de cereais com zinco: biofortificação agrônômica ou genética?. *Plant Soil*, v. 302, p. 1–17, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-007-9466-3>. Acesso em: 06 jul. 2025.

CECCHERINI, G. J.; GASTALDI, V.; NADAI, T. J. L. de L.; SALA, F. C.; FRANÇA, C. de F. M.; VERRUMA-BERNARDI, M. R.; SILVA, P. P. M. da; PURQUERIO, L. F. V. Avaliação agrônômica e cor instrumental de rúcula baby leaf cultivada em hidroponia com concentrações crescentes de ferro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PRODUTOS DE HORTALIÇAS – CBPH, 3., 2024, Piracicaba. *Anais...*Piracicaba: ESALQ-USP, 2024. p. 75-81. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003212871>. Acesso em: 01 jul. 2025.

CEPEA - CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA.

Hortifrutis que melhoram a imunidade e podem render boas oportunidades ao produtor. Hortifruti Brasil, ano 18, n. 199, 10 abr. 2020. Disponível em:

<https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/acessar/completo/hortifrutis-que-melhoram-a-imunidade-e-podem-render-boas-oportunidades-ao-produtor.aspx>. Acesso em: 15 jun. 2024.

CHEN, W. W.; YANG, J. L.; QIN, C.; JIN, C. W.; MO, J. H.; YE, T.; ZHENG, S. J. Nitric oxide acts downstream of auxin to trigger root ferric-chelate reductase activity in response to iron deficiency in Arabidopsis. *Plant Physiology*, v. 154, n. 2, p. 810–819, out. 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20699398/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

CIPRIANO, P. E.; MARTINS, F. A. D.; CONDÉ, A. B. T.; NAMORATTO, F. A.; SILVA, M. A.; SOUSA, G. F.; LOPES, G.; GUILHERME, L. R. G. Biofortificação genética e biofortificação agrônômica. Belo Horizonte: EPAMIG, 2024. (Circular Técnica, n. 406). Disponível em: <https://www.livrariaepamig.com.br/wp-content/uploads/2024/08/CT-406.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

COELHO, A. R. F.; PESSOA, C. C.; MARQUES, A. C.; LUÍS, I. C.; DACCAK, D.; SIMÕES, M.; REBOREDO, F. H.; PESSOA, M.; SILVA, M. M.; LEGOINHA, P. Agronomic biofortification with Fe and Zn in organic tomatoes (*Lycopersicon esculentum* L.). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER, ENERGY, FOOD AND SUSTAINABILITY – ICOWEFS, 1., 2021. *Proceedings...* Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 164–169. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-75315-3_19. Acesso em: 02 jul. 2025.

COLODETE, C. M.; RAMOS, A. C.; JESUS, E. C.; SILVA, F. A.; BERTOLAZI, A. A. Estratégias para biofortificação de ferro em plantas. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 7, p. 1–18, jul. 2024. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5971>. Acesso em: 15 jun. 2025.

COMETTI, N. N.; FURLANI, P. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Soluções nutritivas: formulação e aplicações. In: MANLIO S. F. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 89-114. Disponível em: https://www.academia.edu/13588809/Solu%C3%A7%C3%B5es_Nutritivas_formula%C3%A7%C3%A3o_e_aplica%C3%A7%C3%B5es. Acesso em: 06 jul. 2025.

COTTA, R. S. O solo como ambiente para a vida microbiana. In: CARDOSO, N. B. J. E.; ANDREOTE, D. F. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2016. cap. 2, p. 23–36. Acesso em:

https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/Microbiologia_solo.pdf. Acesso em: 28 ago. 2025.

CRUZ, J. L.; PELACANI, C. R.; COELHO, E. F.; CALDAS, R. C.; ALMEIDA, A. Q.; QUEIROZ, J. R. Influência da salinidade sobre o crescimento, absorção e distribuição de sódio, cloro e macronutrientes em plântulas de maracujazeiro-amarelo. **Bragantia**, v. 65, n. 2, p. 275–284, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052006000200009>. Acesso em: 02 jul. 2025.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91–132. Disponível em:

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/541704>. Acesso em: 13 jun. 2025.

DIAS, I. G.; VERSARI, L. R.; RODRIGUES, L. C.; FELIPE, R. T. A.; COUTO, M. F.; SABINO, D. C. C. Capacidade de produção de auxina e de promoção do crescimento de plântulas de arroz por isolados de *Azospirillum*. **Iniciação Científica e Suas Múltiplas Aplicabilidades 1**, p. 80-92, nov. 2020. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.35170/ss.ed.97865862832591.06>. Acesso em: 06 jul. 2025.

DURALIJA, B.; MIKEC, D.; JÚRIC, S.; LAZAREVIC, B.; MASLOV, B. L.; VLAHOVICEK-KAHLINA, K.; VINCEKOVIC, M. Strawberry fruit quality with the increased iron application. **Acta Horti**, v. 1309, p. 1033–1040, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.17660/ActaHort.2021.1309.146>. Acesso em: 28 ago. 2025.

EL-JENDOUBI, H.; VÁZQUEZ, S.; CALATAYUD, Á.; VAVPETIČ, P.; VOGEL-MIKUŠ, K.; PELICON, P.; ABADÍA, J.; ABADÍA, A.; MORALES, F. The effects of foliar fertilization with iron sulfate in chlorotic leaves are limited to the treated area: a study with peach trees (*Prunus persica* L. Batsch) grown in the field and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) grown in hydroponics. **Frontiers in Plant Science**, v. 5, p. 2, 19 jan. 2014. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2014.00002/full>. Acesso em: 06 jul. 2025.

EPSTEIN, E. BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. Disponível em:

<https://lmpcp.paginas.ufsc.br/files/2022/06/nutri%C3%A7%C3%A3o-mineral-de-plantas-princ%C3%ADpios-e-conceitos.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2025.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2002. Disponível em:

https://students.aiu.edu/submissions/profiles/resources/onlineBook/b7U2y5_Growth_and_Mineral_Nutrition_of_Field_Crops-Third_Edition.pdf. Acesso em: 13 jun. 2025.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. Nutrição de ferro da planta: química e fisiologia da sua deficiência e toxidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 25, n. 4, p. 553-70, 1990. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/197858?locale=en>. Acesso em: 15 jun. 2025.

- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. Curso de Pós-Graduação Lato Sensu (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente. Disponível em: https://dcs.ufla.br/images/imagens_dcs/pdf/Prof_Faquin/Nutricao%20mineral%20de%20plantas.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.
- FERNANDES, A. R.; CARVALHO, J. G.; CURTI, N.; PINTO, J. E. B.; GUIMARÃES, P. T. G. Nutrição mineral de mudas de pupunheira sob diferentes níveis de salinidade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 11, p. 1613–1619, nov. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001100013>. Acesso em: 06 jul. 2025.
- FILHO, S. S. W.; OLIVEIRA, P. R. J. **Introdução**. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). *A cultura da Acerola*. 1. ed. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. p. 15–16. Disponível em: <https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00074720.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- FLORIANO, J. M.; KUNZ, S. N.; PINHO, P. J. de; CASABONNET, C. T.; ABREU, E. da L.; AZEVEDO, E. B. Mineral enrichment in carrot with different sources and doses of zinc. *Revista Ceres*, v. 65, n. 2, p. 158-164, mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201865020007>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- FOLEGATTI, S. I. M.; MATSUURA, U. A. C. F. Produtos. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). *A cultura da Acerola*. 1. ed. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. cap. 15, p.164-183.
- GARNICA, M.; BACAICOA, E.; MORA, V.; FRANCISCO, S. S.; BAIGORRI, R.; ZAMARREÑO, A. M.; GARCIA-MINA, J. M.. Shoot iron status and auxin are involved in iron deficiency-induced phytosiderophores release in wheat. *Bmc Plant Biology*, v. 18, n. 1, p. 1-14, 4 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1186/s12870-018-1324-3>. Acesso em: 12 jun. 2025.
- GIEHL, R. F. H.; WIRÉN, N. V. Root nutrient foraging. *Plant Physiology*, v. 166, n. 2, p. 509–517, out. 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25082891/>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- GOMES, C. J.; OLIVEIRA, P. R. J.; FILHO, S. S. W. Exigências climáticas. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). *A cultura da Acerola*. 1. ed. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. cap. 2, p. 24–27.
- GONÇALVES, A. S. F.; GONÇALVES, W. M.; SILVA, K. M. J.; OLIVEIRA, R. M. Uso da biofortificação vegetal: uma revisão. *Revista do Centro Universitário de Patos de Minas*, v. 6, p75-87, dez. 2015. Disponível em: <https://revistas.unipam.edu.br/index.php/cerradoagrocencias/article/download/4147/1812/12491>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- GUIRRA, K. S.; SILVA, J. E. S. B. da; SILVA, G. C. S. B. da; DANTAS, B. F.; ARAGÃO, C. A. Germinação de sementes de tomateiro tratadas com fontes de ferro e zinco para biofortificação agrônômica. *Scientia Plena*, v. 11, n. 10, 2015. Disponível em: <https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/2401>. Acesso em: 02 jul. 2025.
- HOHOFF, E.; ZAHN, H.; WEDER, S.; FISCHER, M.; LÄNGLER, A.; MICHAELSEN, A.; KELLER, M.; ALEXU, U. Food Costs of Children and Adolescents Consuming Vegetarian,

Vegan or Omnivore Diets: results of the cross-sectional vechi youth study. **Nutrients**, v. 14, n. 19, p. 4010, 27 set. 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/nu14194010>. Acesso em: 6 jun. 2025.

JEDLIČKOVÁ, V.; EBRAHIMI NAGHANI, S.; ROBERT, H. S. On the trail of auxin: Reporters and sensors. **Plant Cell**, v. 34, n. 9, p. 3200–3213, 25 ago. 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35708654/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452p.

KRAFFT, A.; MURRAY-KOLB, L.; MILMAN, N. Anemia and iron deficiency in pregnancy. **Journal of Pregnancy**, v. 2012, p. 1–10, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2012/241869>. Acesso em: 7 jun. 2025.

KIM, S. A.; GUERINOT, M. L. Mining iron: iron uptake and transport in plants. **Febs Letters**, v. 581, n. 12, p. 2273–2280, abr. 2007. Disponível: <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/j.febslet.2007.04.043>. Acesso em: 01 jul. 2025.

LAURINDO, L. F.; TAKEDA, L. N.; MACHADO, N. M.; OTOBONI, A. M. M. B.; GOUART, R. A.; CATHARIN, V. C. S.; SILVA, L. R.; BARBALHO, S. M.; DIREITO, R. Health benefits of acerola (*Malpighia* spp) and its by-products: a comprehensive review of nutrient-rich composition, pharmacological potential and industrial applications. **Food Bioscience**, v. 62, p. 105422, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105422>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429224018534?via%3Dihub>. Acesso em: 18 jun. 2025.

LEMOINE, N. P.; HOFFMAN, A.; FELTON, A. J.; BAILEY, J. K.; WHITHAM, T. G.; WOJDAK, J. M. Underappreciated problems of low statistical power in ecological field studies. **Ecology**, v. 97, n. 3, p. 632–639, 2016. Disponível em: <https://www.natelemoine.com/pdfs/Lemoine%20et%20al%202016a.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

LIU, Y.; WIRÉN, N. V. Integration of nutrient and water availabilities via auxin into the root developmental program. **Current Opinion In Plant Biology**, v. 65, p. 102117, fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102117>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526621001175>. Acesso em: 17 jun. 2025.

LOHSE, G.; HEDRICH, R. Characterization of the plasma-membrane H⁺-ATPase from *Vicia faba* guard cells. **Planta**, v. 188, n. 2, p. 206–214, set. 1992. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/bf00216815>. Acesso em: 02 jul. 2025.

LUO, W. G.; LIANG, Q. W.; SU, Y.; HUANG, C.; MO, B. X.; YU, Y.; XIAO, L. T. Auxin inhibits chlorophyll accumulation through ARF7-IAA14-mediated repression of chlorophyll biosynthesis genes in *Arabidopsis*. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1172059, 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10157223/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MACHADO, F. M. V. F.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G.; PIEDADE, S. M de S. Avaliação da disponibilidade de ferro em ovo, cenoura e couve e em suas misturas. **Ciência e**

Tecnologia de Alimentos, v. 26, n. 3, p. 610-618, set. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-20612006000300020>. Acesso em: 12 jun. 2025.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p. ISBN 8531800471.

MARSCHNER, H. Marschner's mineral nutrition of higher plant. 3ed, New York: Academic Press, 2012. 672p. Disponível em: https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf. Acesso em: 06 jul. 2025.

MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V. Strategies of plants for acquisition of iron. **Plant and Soil**, v. 165, p. 261–274, 1994. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00008069>. Acesso em: 15 jun. 2025.

MARZAL, A.; CERVERA, A.; BLASCO, C.; MARTÍNEZ-FUENTES, A.; REIG, C.; LO BIANCO, R.; MESEJO, C.; AGUSTÍN, M. Influence of stem and bud auxin levels on bud release and flower meristem formation in Citrus. **Plant Science**, v. 354, p.1–8, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112438>. Acesso em: 01 set. 2025.

MCATEE, P.; KARIM, S.; SCHAFFER, R.; DAVID, K. A dynamic interplay between phytohormones is required for fruit development, maturation, and ripening. **Front Plant Sci**, v. 4, p. 1–7, abr 2013. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3628358/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

MOOSAVI, A. A.; RONAGHI, A. Influence of foliar and soil applications of iron and manganese on soybean dry matter yield and iron-manganese relationship in a Calcareous soil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 5, n. 12, p. 1550–1556, 2011. Disponível em: https://www.cropj.com/moosavi_5_12_2011_1550_1556.pdf. Acesso em:

MOREIRA, S. G.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V.; SILVA, B. M.; KIEHL, J. de C.; SILVA, C. G. M. Efeito da calagem na disponibilidade de micronutrientes para soja cultivada em solo sob diferentes tempos de cultivo em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 89–97, jan./mar. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/wv7Hh3wknbpkFnBdjZg5S5L/?lang=pt>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MORETI, U. de S.; PEREIRA, J. C. S.; ALTHMAN, M. P. F. Auxina: hormônio de desenvolvimento fisiológico vegetal. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia da FAEF**, v. 33, n. 1, p. 1–15, jun. 2018. Disponível em: https://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/Bcjb0h9bQNR0iFt_2018-11-6-12-29-34.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

MORRISSEY, J.; GUERINOT, M. L. Iron uptake and transport in plants: The good, the bad, and the ionome. **Chemical Reviews**, v. 109 n. 10, p. 4553–4567, 2009. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr900112r>. Acesso em: 01 jul. 2025.

NETO, A. P. de S. Interação entre nitrogênio, fósforo e potássio na cultura da soja. 2009. 94f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-18022010-140953/publico/Ana_Paula_Neto.pdf. Acesso em: 13 jun. 2025.

NETTO, A. G.; ARDITTO, E. F. G.; GARCIA, E. E. C.; BLEINROTH, E. W.; FREIRE, F. C. O.; MENEZES, J. B.; BORDIN, M. R.; BRAGA SOBRINHO, R.; ALVES, R. E. Acerola para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita. Brasília-DF: EMBRAPA-SPI, 1996. 30 p. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/183126/1/Frupex-Acerola-para-Exportacao-Prodecimentos-de-Colheita-e-Pos-colheita-1996.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

NING, X.; LIN, M.; HUANG, G.; MAO, J.; GAO, Z.; WANG, X. Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. **Front Plant Sci**, v. 14, p. 1 – 11, jul. 2023. Disponível em:

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10351017/pdf/fpls-14-1190768.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

NUTTI, M. R.; CARVALHO, J. L. V.; WATANABE, E. Biofortificação como ferramenta para combate a deficiências em micronutrientes. In: WORKSHOP INTERNACIONAL DE GEOLOGIA MÉDICA, 2005, Rio de Janeiro. **Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente**. Rio de Janeiro: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2006. p. 43–47. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/994883>. Acesso em: 28 jun. 2025.

OHLAND, T.; PIO, R.; CHAGAS, E. A.; BARBOSA, W.; DALASTRA, I. M.; KOTZ, T. E. Enraizamento de estacas apicais lenhosas de figueira ‘Roxo de Valinhos’ com aplicação de AIB e cianamida hidrogenada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 1, p. 273–279, mar. 2009. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbf/a/Bh9VbjcGkBD8D33jnMdRqJw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 jun. 2025.

OLIVEIRA, J. R. P.; FILHO, W. dos S. S.; KOBAYASHI, A. K.; RITZINGER, R. Aspectos Botânicos. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). **A cultura da Acerola**. 1. ed. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. cap. 1, p. 17–23. Disponível em: <https://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00074720.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. do. Interações entre auxinas e ácido bórico no enraizamento de estacas caulinares de *Coffea arabica* L. cv. Mundo Novo. **Scientia Agrícola**, v. 49, p. 5–9, 1992. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/sa/a/7wjXhgGdvZkWvv9bhdFvyWk/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **The world health report: 2002: reducing risks, promoting healthy life**. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2002. 248 p.

Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9241562072>. Acesso em: 5 jun. 2025.

ÖSTIN, A.; KOWALYCZK, M.; BHALERAO, R. P.; SANDBERG, G. Metabolism of indole-3-acetic acid in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v. 118, n. 1, p. 285–296, set. 1998. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9733548/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

OVERVOORDE, P., FUKAKI, H., BEECKMAN, T. Auxin control of root development. **Cold Spring Harb. Perspect. Biol.** 2, a001537, 2010. Disponível em:

<https://cshperspectives.cshlp.org/content/2/6/a001537.short>. Acesso em: 06 jul. 2025.

PAULILO, M. T. S.; VIANA, A. M.; RANDI, A. M. **Fisiologia Vegetal**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015. Disponível em: <https://antigo.uab.ufsc.br/biologia/files/2020/08/Fisiologia-Vegetal.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2025.

PEER, W. A. From perception to attenuation: auxin signalling and responses. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 16, n. 5, p. 561–568, out. 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24004572/>. Acesso em: 17 jun. 2025.

PENG, Y.; UPRICHARD, J. Ferritin and iron studies in anaemia and chronic disease. **Annals Of Clinical Biochemistry: International Journal of Laboratory Medicine**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 43-48, 7 nov. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1177/0004563216675185>. Acesso em: 7 jun. 2025.

PESTANA, M.; VARÉNNES, A. de; CORREIA, P. J. Clorose férrica induzida pelo calcário. **Revista Ceres**, v. 61, supl., p. 849–855, nov./dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/cdjSNvh7X8DqjVYwNhnCx5p/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 8 jun. 2025.

PIO, R. **O cultivo da acerola**. Piracicaba: ESALQ, Divisão de Biblioteca e Documentação, 2003. 28 p. il. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/publicacoes-a-venda/pdf/SPR20.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

PORCU, O. M.; RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Variation in the carotenoid composition of acerola and its processed products. **Journal of The Science Of Food And Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1916-1920, 17 jul. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.2562>. Acesso em: 12 jun. 2025.

QUEIROGA, V. P.; GOMES, J. P.; MENDES, N. V. B.; QUEIROZ, A. J. M.; LIMA, D. C.; FIGUEIRÊDO NETO, A.; GIRÃO, Ê. G.; ALBUQUERQUE, E. M. B. (eds.). **Sistema produtivo da acerola (*Malpighia emarginata* Sessé & Mociño ex D.C.)**. Campina Grande, PB: Embrapa, 2023. 127 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1162484/1/Sistema-produtivio-acerola-2023.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2025.

RAJONANDRAINA, T.; UEDA, Y.; WISSUWA, M.; KIRK, G. J. D.; RAKOTOSON, T.; MANWARING, H.; ANDRIAMANANJARA, A.; RAZAFIMBELO, T. Magnesium supply alleviates iron toxicity-induced leaf bronzing in rice through exclusion and tissue-tolerance mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 1213456, 21 jul. 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10403268/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

REINHARDT, D. H.; OLIVEIRA, J. R. P. Manejo pós-colheita. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). **A cultura da acerola**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. cap. 14, p. 150–163.

RIBEIRO, G. D.; COSTA, J. N. M.; VIEIRA, A. H.; SANTOS, M. R. A. **Enxertia em fruteiras**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2005. 28 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/859550/1/rt92enxertiadefruteiras.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

- RIOS, S. A.; ALVES, K. R.; COSTA, N. M. B.; MARTINO, H. S. D. Biofortificação: culturas enriquecidas com micronutrientes pelo melhoramento genético. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 6, p. 713–718, nov./dez. 2009. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3052/305226942001.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- RORIZ, M.; CARVALHO, S. M. P.; CASTRO, P. M. L.; VASCONCELOS, M. W. Legume biofortification and the role of plant growth-promoting bacteria in a sustainable agricultural era. **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 435, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/3/435>. Acesso em: 06 jul. 2025.
- SADALI, N. M.; SOWDEN, R. G.; LING, Q.; JARVIS, R. P. Diferenciação de cromoplastos e outros plastídios em plantas. **Plant Cell Reports**, v. 38, p. 803–818, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00299-019-02420-2>. Acesso em: 06 jul. 2025.
- SAINI, P. K.; BHATI, J.; KUMAR, R.; CHATURVEDI, M.; GOYAL, G.; SHUKLA, S.; TRIPATHI, L. K.; SINGH, S.; SRIVASTAVA, S. K. Iron uptake strategies and different genes in rice biofortification. **African Journal of Food Science and Technology**, v. 15, n. 1, 2024. Disponível em: https://www.interestjournals.org/articles/iron-uptake-strategies-and-different-genes-in-rice-biofortification-105100.html?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 06 jul. 2025.
- SALAZAR-IRIBE, A.; DE-LA-PEÑA, C. Auxins, the hidden player in chloroplast development. **Plant Cell Reports**, v. 39, n. 12, p. 1595–1608, dez. 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32960306/>. Acesso em: 05 jul. 2025.
- SHAKYA, R., SINGH, N.; BHATLA, S. C. A homeostase do ferro regula a maturação de frutos de tomate (climatéricos) e pimentão (não climatéricos). **J. Plant Biochem. Biotechnol.** v. 30, n. 2, p. 392–395, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13562-020-00611-7>. Acesso em: 25 ago. 2025.
- SICHERI, R.; COITINHO, D. C.; MONTEIRO, J. B.; COUTINHO, W. F. Recomendações de alimentação e nutrição saudável para a população brasileira. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia**, São Paulo, v. 44, n. 3, p. 227–232, jun. 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0004-27302000000300007>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- SIMOPOULOS, A. P.; GOPALAN, C. **Plants in human health and nutrition policy**. Basel: Karger, 2003. 91 p.
- SINGH, K. K.; CHAUHAN, J. S.; KUMAR, P.; RAWAT, J. M. S.; SUWALKA, R. L. A review: effect of auxins, rooting media and vegetative propagation methods of apple (*Malus* spp.). **European Journal of Biotechnology and Bioscience**, v. 7, n. 2, p. 82–88, mar. 2019. Disponível em: <http://www.biosciencejournals.com/archives/2019/vol7/issue2/7-2-22>. Acesso em: 18 jun. 2025.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE PEDIATRIA. Deficiência de ferro: diagnóstico, prevenção e tratamento. Rio de Janeiro: SBP, 2004. Disponível em: https://www.sbp.com.br/fileadmin/user_upload/pdfs/Documento_def_ferro200412.pdf. Acesso em: 6. jun. 2025.
- SOUZA, D. L.; GOMES, C. J.; SOUZA, S. L. Manejo e conservação do solo. In: RITZINGER, R.; KOBAYASHI, A. K.; OLIVEIRA, J. R. P. (org.). **A cultura da Acerola**. 1. ed. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2003. cap. 3, p. 29–47.

- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Tipos de solo: Latossolos**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo/tipos-de-solo/latossolos>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. Plant physiology and development. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2015. Disponível em: <https://archive.org/details/taiz-zeiger-fisiologia-vegetal-6a-ed/page/XXII/mode/2up?view=theater&q=AUXINAS>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- TANIN, M. J.; SAINI, D. K.; KUMAR, P.; GUDI, S.; SHARMA, H.; KAUR, J. P.; ABASSY, O.; BROMAND, F.; SHARMA, A. Iron biofortification in wheat: past, present, and future. **Current Plant Biology**, v. 38, art. 100328, fev. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378151284_Iron_Biofortification_in_Wheat_Past_Present_and_Future. Acesso em: 06 jul. 2025.
- THE JAMOVI PROJECT. **Jamovi** (versão 2.6.44) [software]. 2024. Disponível em: <https://www.jamovi.org/>. Acesso em: 04 jul. 2025.
- VANNESTE, S.; FRIML, J. Auxin: a trigger for change in plant development. **Cell**, v. 136, n. 6, p. 1005–1016, 20 mar. 2009. DOI: 10.1016/j.cell.2009.03.001. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19303845/>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- VELLOZO, E. P.; FISBERG, M. O impacto da fortificação de alimentos na prevenção da deficiência de ferro. **Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia**, [S.L.], v. 32, p. 134–139, jun. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1516-84842010005000069>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- VERGUTZ, L.; LUZ, J. M. R.; SILVA, M. C. S.; KASUYA, M. C. M. Biofortificação de alimentos: saúde ao alcance de todos. **Boletim Informativo da SBCS**, v. 42, n. 2, p. 20–23, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309205340_Biofortificacao_de_alimentos_saude_a_o_alcance_de_todos. Acesso em: 19 jun. 2025.
- VIEIRA, E. L. **Ação de bioestimulante na germinação de sementes, vigor de plântulas, crescimento radicular e produtividade de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) e arroz (*Oryza sativa* L.)**. 2019. 313 f. Tese (Doutorado) — Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-20191220-142850/publico/VieiraElvisLima.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- WANG, W.; KNOVICH, M. A.; COFFMAN, L. G.; TORTI, F. M.; TORTI, S. V. Serum ferritin: past, present and future. **Biochimica Et Biophysica Acta (Bba) - General Subjects**, v. 1800, n. 8, p. 760-769, ago. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbagen.2010.03.011>. Acesso em: 06 jul. 2025.
- WANG, Y.; ZHANG, G.; HUANG, Y.; GUO, M.; SONG, J.; ZHANG, T.; LONG, Y.; WANG, B.; LIU, H. A potential biofertilizer-Siderophilic bacteria isolated from the rhizosphere of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, art.

870413, 2022. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.870413/full>.

Acesso em: 06 jul. 2025.

YANG, R.; ZHOU, Z.; SUN, G.; GAO, Y.; XU, J. Ferritin, a novel vehicle for iron supplementation and food nutritional factors encapsulation. **Trends In Food Science & Technology**, v. 44, n. 2, p. 189-200, ago. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.005>. Acesso em: 06 jul. 2025.

YANG, Y.; HILLEBRAND, H.; LAGISZ, M.; CLEASBY, I.; NAKAGAWA, S. Low statistical power and overestimated anthropogenic impacts, exacerbated by publication bias, dominate field studies in global change biology. **Global Change Biology**, v. 28, n. 3, p. 969–989, fev. 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15972>. Acesso em: 06 jul. 2025.

ZANCUL, M. S. Fortificação de alimentos com ferro e vitamina A. **Medicina (Ribeirão Preto)**, [S.L.], v. 37, n. 1/2, p. 45-50, 30 jun. 2004. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rmrp/article/view/469>. Acesso em: 12 jun. 2025.