



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CAMPUS PROFESSORA CINOBELINA ELVAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

FELIPE TOTE NUNES PONTES

**MANEJO EQUILIBRADO ENTRE N E K NA NUTRIÇÃO, SISTEMA
ANTIOXIDANTE, PRODUÇÃO E QUALIDADE DO ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’**

Bom Jesus – PI

2026

FELIPE TOTE NUNES PONTES

**MANEJO EQUILIBRADO ENTRE N E K NA NUTRIÇÃO, SISTEMA
ANTIOXIDANTE, PRODUÇÃO E QUALIDADE DO ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Produção Vegetal, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda

Bom Jesus – PI

2026

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial Campus Professora Cinobelina Elvas
Setor de Processamento Técnico

P814m Pontes, Felipe Tote Nunes.

Manejo equilibrado entre N e K na nutrição, sistema antioxidante, produção e qualidade do abacaxizeiro pérola / Felipe Tote Nunes

Pontes. -- 2026.

93 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Bom Jesus, Piauí, 2026.

“Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior”.

“Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda”.

1. Ciências agrárias. 2. Abacaxi. 3. Nutrição vegetal. I. Silva Júnior, Gabriel Barbosa da. II. Miranda, Rafael de Sousa. III. Título.

CDD 630

Bibliotecária: Nayra Fontinele Feijão – CRB3/1249

FELIPE TOTE NUNES PONTES

**MANEJO EQUILIBRADO ENTRE N E K NA NUTRIÇÃO, SISTEMA
ANTIOXIDANTE, PRODUÇÃO E QUALIDADE DO ABACAXIZEIRO ‘PÉROLA’**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - PPGCA, do Campus Professora Cinobelina Elvas - CPCE, da Universidade Federal do Piauí - UFPI, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias.

Área de concentração: Produção Vegetal.

Linha de Pesquisa: Propagação e Manejo Cultural de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda.

Aprovado em: 25 de fevereiro de 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gabriel Barbosa S. Júnior (UFPI)
Orientador

Prof. Dr. Carlos José G. S. Lima (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

Prof. Dr. Rafael de Souza Miranda (UFPI)
Coorientador

Prof. Dr. Rodrigo Fonseca da Costa (UFPI)
Examinador Externo ao Programa

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto (UFMS)
Examinador Externo ao Programa

A Deus, aos meus pais e aos que caminharam
comigo até aqui.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder força, saúde e sabedoria ao longo desta caminhada, especialmente nos momentos de maior desafio.

Aos meus pais, Raimundo Tote e Elizete Pontes, pelo apoio, incentivo e compreensão ao longo de todo o período do mestrado. Sou muito grato por estarem presentes e por contribuírem para que eu pudesse seguir firme e concluir mais esta etapa.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA/UFPI – CPCE), pela oportunidade de formação e pelo suporte institucional indispensável para a realização deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gabriel Barbosa da Silva Júnior, pela oportunidade e pela confiança no meu potencial. Sua competência e paciência foram fundamentais para meu crescimento e para a realização desta pesquisa. Sou grato pelo apoio constante ao longo de todo o percurso.

Aos professores Dr. Jenilton Cunha e Dr. Rodrigo Fonseca, pela disponibilidade em esclarecer dúvidas e discutir aspectos do trabalho ao longo do mestrado. Suas orientações e contribuições foram fundamentais para fortalecer a condução desta pesquisa.

Aos amigos do Grupo de Estudos em Fruticultura – FRUTAGRO de Teresina, pelo apoio na implantação, condução e avaliação do experimento. Em especial, ao Rômulo Pacheco, que atuou desde a idealização do projeto e contribuiu de forma decisiva para sua execução, compartilhando seu vasto conhecimento sobre a cultura e garantindo a realização de etapas fundamentais do trabalho.

Aos amigos do FRUTAGRO de Bom Jesus, pelo apoio nas rotinas de laboratório, pela colaboração nas atividades do dia a dia e pelo companheirismo durante todo o processo. Em especial, agradeço ao Eduardo Araújo, Mikael Ribeiro, Amanda Meneses e Gustavo de Jesus, pela disponibilidade, parceria e troca de conhecimentos, que tornaram essa caminhada mais leve e produtiva.

Um agradecimento especial à minha amiga Kathully Torres, que marcou minha trajetória e ajudou a moldar a pessoa que sou hoje. Obrigado pela amizade, pelo apoio e pelos aprendizados compartilhados. Sua presença, mesmo à distância, segue sendo um ponto de força para mim.

À minha amiga Karmem Guimarães, meu agradecimento mais sincero por estar presente desde o início do mestrado, sendo suporte diário nas rotinas e desafios dessa caminhada. Obrigado pela amizade, pela disponibilidade e pela ajuda em momentos que fizeram diferença para que eu conseguisse seguir com firmeza e concluir esta etapa.

Aos amigos da Pós-Graduação, pelos momentos de descontração, parceria e apoio ao longo dessa caminhada, que tornaram o percurso mais leve e significativo. Em especial, agradeço a Stefane Rodrigues, Alana Silva, Adriele Ferreira e Helane Severo, pela convivência, troca de experiências e companheirismo durante esse período.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta dissertação, registro minha sincera gratidão. Cada orientação, gesto de apoio, parceria e palavra de incentivo teve seu peso nesta jornada e ajudou a transformar desafios em aprendizado.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá.

RESUMO

A adubação de cobertura com nitrogênio (N) e potássio (K) é determinante para a produtividade e a qualidade dos frutos de abacaxi, porém a definição de doses que conciliem alto rendimento, qualidade e manutenção de processos fisiológicos ainda é pouco consolidada para condições da região Meio-Norte do Piauí. Assim, objetivou-se avaliar os efeitos de doses de N e K₂O nos parâmetros nutricionais, fisiológicos, bioquímicos, de produção e qualidade de frutos do abacaxizeiro ‘Pérola’. O experimento foi conduzido com abacaxizeiro ‘Pérola’ em fileiras duplas no espaçamento de 0,90 × 0,40 × 0,40 m, com irrigação por gotejamento. O delineamento foi em blocos casualizados, esquema fatorial 4 × 2, quatro doses de N (0, 160, 320 e 640 kg ha⁻¹) e duas de K₂O (240 e 480 kg ha⁻¹), com 4 repetições. A aplicação de ureia e cloreto de potássio (KCl) foi feita em cobertura, de forma parcelada aos 60, 150, 210 e 270 dias após o transplântio (DAT). A indução floral ocorreu aos 360 DAT com Ethrel[®] 720 e a colheita aos 480 DAT, no estágio comercial. Foram avaliados os teores de clorofila a, b e total; atividade antioxidante das enzimas SOD, CAT, APX e G-POD em folhas e raízes; teores foliares de macronutrientes na folha ‘D’ e acúmulo e eficiências nutricionais de absorção, translocação e uso; massa seca da parte aérea e das raízes, comprimento e largura da folha ‘D’; massa do fruto com coroa e sem coroa, produtividade, rendimento de polpa; pH, acidez titulável, sólidos solúveis, relação SS/AT, vitamina C, proteínas totais e açúcares totais dos frutos. Os dados foram submetidos a ANOVA e aplicado análise de regressão. Complementarmente, realizou-se PCA, rede de correlação de Pearson e aplicado a função de desejabilidade. As análises foram realizadas no software R. Os resultados indicaram que o manejo de N e K₂O afetou o estado nutricional, refletindo-se em alterações simultâneas nos atributos fisiológicos, bioquímicos, produtivos e de qualidade dos frutos. Doses intermediárias de N, especialmente quando associadas às doses de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, estiveram relacionadas ao melhor equilíbrio entre crescimento vegetativo e produção, com incremento dos pigmentos fotossintéticos e ganhos em produtividade e em variáveis de qualidade química do fruto. Em contraste, doses baixas de N limitaram o vigor a produção e a qualidade dos frutos, sendo acompanhadas por respostas indicativas de ajustes fisiológicos, como baixo teor de clorofila *a* e *b* e restrição nutricional, como redução do teor foliar acúmulo de macronutrientes. Por outro lado, a dose de 640 kg ha⁻¹ de N promoveu maior desenvolvimento vegetativo, porém com retorno reduzido em produtividade e qualidade, apresentando maior atividade enzimática do sistema antioxidante como mecanismo de proteção metabólica. A combinação de 355 kg ha⁻¹ de N e 480 kg ha⁻¹ de

K₂O proporciona o melhor desempenho agronômico, com aumento da produtividade e aprimoramento dos atributos de qualidade dos frutos.

Palavras-chave: *Ananas comosus*, Eficiência nutricional, Pigmentos fotossintéticos, Sistema antioxidante, Teor foliar de nutrientes.

ABSTRACT

A topdressing fertilization strategy with nitrogen (N) and potassium (K) is crucial for pineapple fruit yield and quality; however, defining rates that reconcile high yield, quality, and the maintenance of physiological processes remains insufficiently established under the conditions of the Mid-North region of Piauí, Brazil. Thus, this study aimed to evaluate the effects of N and K₂O rates on nutritional, physiological, biochemical, yield, and fruit-quality parameters of ‘Pérola’ pineapple. The experiment was conducted with ‘Pérola’ pineapple grown in double-row planting at 0.90 × 0.40 × 0.40 m spacing under drip irrigation. A randomized complete block design was adopted in a 4 × 2 factorial arrangement, consisting of four N rates (0, 160, 320, and 640 kg ha⁻¹) and two K₂O rates (240 and 480 kg ha⁻¹), with four replications. Urea and potassium chloride (KCl) were applied as split topdressings at 60, 150, 210, and 270 days after transplanting (DAT). Floral induction was performed at 360 DAT using Ethrel® 720, and harvest occurred at 480 DAT at the commercial maturity stage. The following variables were assessed: chlorophyll *a*, *b*, and total; antioxidant enzyme activities (SOD, CAT, APX, and G-POD) in leaves and roots; foliar macronutrient concentrations in the ‘D’ leaf and nutrient accumulation as well as nutritional efficiencies of absorption, translocation, and use; shoot and root dry mass, and ‘D’ leaf length and width; fruit mass with crown and without crown, yield, and pulp yield; and fruit pH, titratable acidity, soluble solids, SS/TA ratio, vitamin C, total proteins, and total sugars. Data were subjected to ANOVA followed by regression analysis. Additionally, principal component analysis (PCA), a Pearson correlation network, and the desirability function were applied. Analyses were performed using R software. The results indicated that N and K₂O management affected nutritional status, resulting in simultaneous changes in physiological, biochemical, productive, and fruit-quality attributes. Intermediate N rates, especially when combined with 480 kg ha⁻¹ K₂O, were associated with a better balance between vegetative growth and production, increasing photosynthetic pigments and improving yield and chemical quality traits of the fruit. In contrast, low N rates limited plant vigor, yield, and fruit quality and were accompanied by responses indicative of physiological adjustment, such as low chlorophyll *a* and *b* contents, and nutritional constraint, such as reduced foliar macronutrient concentrations and accumulation. Conversely, 640 kg ha⁻¹ N promoted greater vegetative growth, but with diminished returns in yield and quality, and elicited higher antioxidant enzyme activity as a metabolic protection mechanism. The combination of 355 kg ha⁻¹ N and 480 kg ha⁻¹ K₂O provides the best agronomic performance, increasing yield and enhancing fruit-quality attributes.

Keywords: *Ananas comosus*, Nutritional efficiency, Photosynthetic pigments, Antioxidant system, Leaf nutrient content.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização e caracterização da área experimental.....	25
Figura 2 -	Condições meteorológicas mensais durante a condução do experimento.....	26
Figura 3 -	Obtenção e preparo de mudas tipo filhote para implantação do experimento.....	27
Figura 4 -	Plantio e sistema de irrigação por gotejamento.....	28
Figura 5 -	Croqui experimental e disposição dos tratamentos nos blocos.....	29
Figura 6 -	Pesagem, preparo e aplicação de ureia e KCl nos tratamentos.....	30
Figura 7 -	Manejo cultural: capina e proteção dos frutos contra insolação.....	31
Figura 8 -	Avaliações pós-colheita: pesagem dos frutos e preparo das amostras.....	35
Figura 9 -	Análises físico-químicas: pH, acidez titulável e sólidos solúveis.....	36
Figura 10 -	Crescimento vegetativo em resposta a doses de N.....	41
Figura 11 -	Teores de macronutrientes na folha 'D' em resposta à adubação de N e K.....	44
Figura 12 -	Acúmulo de N, P e K na parte aérea e raiz em resposta à adubação de N e K.....	46
Figura 13 -	Acúmulo de Ca, Mg e S na parte aérea e raiz em resposta à adubação de N e K..	47
Figura 14 -	Eficiência de absorção de macronutrientes em resposta a doses de N.....	50
Figura 15 -	Eficiência de translocação de macronutrientes em resposta a doses de N.....	52
Figura 16 -	Eficiência de uso de macronutrientes em resposta à adubação de N e K.....	53
Figura 17 -	Pigmentos fotossintéticos em resposta à adubação de N e K.....	55
Figura 18 -	Atividade de SOD e CAT em folhas e raízes em resposta à adubação de N e K..	57
Figura 19 -	Atividade de APX e G-POD em folhas e raízes em resposta à adubação de N e K.....	58
Figura 20 -	Componentes de produção em resposta à adubação de N e K.....	60
Figura 21 -	Qualidade físico-química (pH, AT, SS e SS/AT) em resposta à adubação de N e K.....	63
Figura 22 -	Vitamina C, proteínas e açúcares totais em resposta à adubação de N e K.....	64
Figura 23 -	Agrupamento e PCA das variáveis avaliadas em resposta à adubação de N e K..	65
Figura 24 -	Registro fotográfico de plantas, folha 'D' e frutos sob doses de N e K.....	67
Figura 25 -	Rede de correlação entre variáveis sob doses de N e K.....	69
Figura 26 -	Respostas preditas e dose ótima pelo método de desejabilidade.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Análise de solo (0-20 cm) antes da implantação do experimento.....	29
Tabela 2 -	Doses parceladas de ureia e KCl aplicadas em cobertura por tratamento.....	30
Tabela 3 -	ANOVA de MSPA, MSR, comprimento e largura da folha 'D'	40
Tabela 4 -	ANOVA do teor foliar e acúmulo (parte aérea e raiz) de N, P, K, Ca, Mg e S...	42
Tabela 5 -	ANOVA das eficiências de absorção, translocação e uso de N, P, K, Ca, Mg e S.....	49
Tabela 6 -	ANOVA de clorofila a, clorofila b, clorofila total e carotenoides.....	54
Tabela 7 -	ANOVA das enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX e G-POD) em folhas e raízes.....	56
Tabela 8 -	ANOVA de MFCC, MFSC, rendimento de polpa e produtividade.....	60
Tabela 9 -	ANOVA de pH, AT, SS, SS/AT, vitamina C, proteínas e açúcares totais.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Aspectos gerais da cultura do abacaxi	18
2.2	Nutrição do abacaxizeiro	19
2.3	Qualidade do fruto do abacaxi	21
2.4	Pigmentos fotossintéticos.....	22
2.5	Sistema antioxidante enzimático em plantas.....	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Caracterização da área experimental	25
3.2	Aquisição das mudas	26
3.3	Preparo do solo, plantio e irrigação	27
3.4	Tratamentos e delineamento experimental	28
3.5	Método, época e fonte para indução floral	31
3.6	Controle de plantas infestantes, pragas e doenças.....	31
3.7	Colheita	32
3.8	Variáveis analisadas	32
3.8.1	Parâmetros fisiológicos.....	32
3.8.2	Parâmetros bioquímicos.....	32
3.8.3	Parâmetros nutricionais	33
3.8.3.1	Teor foliar de macronutrientes.....	33
3.8.3.2	Eficiência nutricional.....	34
3.8.4	Parâmetros de crescimento vegetativo.....	34
3.8.5	Parâmetros de produção.....	34
3.8.6	Parâmetros de qualidade do fruto	35
3.9	Análise estatística	37
3.9.1	Análise de variância e regressão	37
3.9.2	Análise de componentes principais (PCA)	38
3.9.3	Rede de correlação.....	38
3.9.4	Otimização multivariada por função de desejabilidade	38
3.9.5	Recursos computacionais.....	39
4	RESULTADOS	40
4.1	Parâmetros de crescimento vegetativo.....	40

4.2	Parâmetros nutricionais.....	41
4.2.1	Teor foliar e acúmulo de macronutrientes	41
4.2.1.1	Teor foliar de macronutrientes.....	43
4.2.1.2	Acúmulo de macronutrientes	45
4.2.2	Eficiência nutricional.....	48
4.2.2.1	Eficiência de absorção de macronutrientes.....	50
4.2.2.2	Eficiência de translocação de macronutrientes	51
4.2.2.3	Eficiência de uso de macronutrientes	52
4.3	Parâmetros fisiológicos.....	54
4.4	Parâmetros bioquímicos.....	56
4.5	Parâmetros de produção	59
4.6	Parâmetros de qualidade do fruto.....	61
4.7	Análise multivariada para os parâmetros fisiológicos, bioquímicos, nutricionais, vegetativos, produção e qualidade de fruto	64
4.7.1	Análise de agrupamento hierárquico e componentes principais.....	65
4.7.2	Análise de rede de correlação	68
4.7.3	Aplicação da função de desejabilidade.....	70
5	DISCUSSÃO	73
5.1	O fornecimento de doses distintas de nitrogênio e potássio modulam diferencialmente o crescimento vegetativo e o aparato fotossintético do abacaxizeiro 'pérولا'	73
5.2	A adubação nitrogenada e potássica regula a ativação do sistema antioxidante em folhas e raízes	75
5.3	O equilíbrio N/K regula o acúmulo de macronutrientes entre parte aérea e raízes no abacaxizeiro 'pérولا'	77
5.4	O manejo equilibrado de N e K maximiza a produtividade e melhora a qualidade dos frutos	80
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	83
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

O manejo nutricional do abacaxizeiro é parte fundamental do processo produtivo, pois influencia precocemente o ritmo de desenvolvimento da planta e a formação dos mecanismos que apoiam a produção dos frutos. Em condições tropicais, é comum que os solos cultivados não supram adequadamente as exigências nutricionais da cultura, o que torna a adubação o principal instrumento para manter o estado nutricional em faixa ótima durante o ciclo. Adicionalmente, estudos indicam que todas as etapas do desenvolvimento são significativamente impactadas pelo estado nutricional, o que afeta diretamente tanto a produtividade quanto a qualidade dos frutos. Entre os macronutrientes, destaca-se o potássio como o elemento de maior absorção pelo abacaxizeiro, seguido pelo nitrogênio, evidenciando a importância da adequada calibração desses nutrientes nas práticas de adubação de cobertura (Ribeiro *et al.*, 2019; Cunha *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2021).

O nitrogênio exerce papel central na organização dos processos bioquímicos e fisiológicos das plantas, por integrar aminoácidos, proteínas e sistemas enzimáticos diretamente envolvidos no crescimento, na fotossíntese e no metabolismo do carbono. Do ponto de vista funcional, sua disponibilidade condiciona o desenvolvimento e a manutenção do aparato fotossintético, modulando a capacidade de assimilação de CO₂ e, consequentemente, a geração de poder redutor e energia química, além do suprimento de esqueletos de carbono que sustentam a biossíntese e a alocação de assimilados entre os diferentes compartimentos da planta (Ru *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2025).

Evidências em diferentes espécies mostram que variações no suprimento de N alteram o teor de clorofila e a fotossíntese. Além disso, a assimilação de N está ligada ao controle do estado redox e ao equilíbrio metabólico, especialmente quando a demanda por energia é alta. Em conjunto, esses processos determinam a disponibilidade de carbono e energia e sua distribuição entre os órgãos, de modo que o crescimento é, em grande parte, resultado dessas alterações fisiológicas e bioquímicas (Bassi; Menossi; Mattiello, 2018; Rios *et al.*, 2018a; Evans; Clarke, 2019; Cao *et al.*, 2025).

O potássio é o principal cátion inorgânico do citosol vegetal e exerce funções regulatórias essenciais. Ele participa do controle osmótico e do turgor celular, modula a abertura estomática e a eficiência do uso da água, ativa diversas enzimas e favorece o carregamento e o transporte de fotoassimilados no floema (Johnson *et al.*, 2022). Nesse sentido, a disponibilidade adequada de K tende a se refletir na fisiologia da planta, no estado hídrico e nas trocas gasosas, além de influenciar o metabolismo de carboidratos e a capacidade antioxidante (Ahanger *et al.*,

2015). No abacaxizeiro, resultados de campo indicam que a adubação potássica pode aumentar atributos físicos do fruto e melhorar indicadores químicos associados à qualidade, como sólidos solúveis, acidez titulável e vitamina C. Isso reforça que o K não se limita a influenciar o aumento do fruto, mas também modula o seu perfil de qualidade (Bonomo *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2021).

Como N e K controlam processos complementares, o balanço entre ambos é determinante para a eficiência do sistema. Quando as doses são desajustadas, podem ocorrer custos fisiológicos associados a limitações metabólicas e a desequilíbrios iônicos e osmóticos, com redução da eficiência de uso de nutrientes e prejuízos na formação e na qualidade do fruto (Ahanger *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2020). Estudos em abacaxizeiro já indicavam respostas consistentes da produção e da qualidade à adubação com N e K, com alterações em atributos como sólidos solúveis e acidez em função do manejo desses nutrientes (Caetano *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2019). Mais recentemente, também se discute que o equilíbrio N K pode modular componentes do metabolismo antioxidante em frutos, reforçando a conexão direta entre nutrição mineral e bioquímica associada à qualidade (Djido *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2025; Lima *et al.*, 2025).

É importante destacar que, no Brasil, a adubação do abacaxi na região de Teresina-PI geralmente se baseia apenas em experiências de cultivos anteriores ou em recomendações aplicadas a outras regiões. Isso ressalta a importância de qualquer informação sobre fertilidade que auxilie no desenvolvimento da cultura. Assim, obter dados específicos sobre a fertilidade do solo e suas necessidades nutricionais é crucial para aprimorar as práticas de manejo e maximizar a produtividade do abacaxi nessa região. Diante desse contexto, objetivou-se determinar a combinação ótima de doses de N e K₂O em adubação de cobertura para o abacaxizeiro ‘Pérola’, visando otimizar o estado nutricional e maximizar o desempenho fisiológico, bioquímico, produtivo e a qualidade dos frutos nas condições do Meio-Norte do Piauí, Nordeste do Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais da cultura do abacaxi

O abacaxizeiro (*Ananas comosus* L., Merrill) é uma planta tropical, monocotiledônea da família Bromeliaceae. É uma planta herbácea perene que possui uma roseta de folhas suculentas que podem ser espinhosas ou não. Estas folhas são responsáveis por armazenar água e nutrientes, permitindo que a planta sobreviva em condições de seca temporária. As folhas atingem de 1 a 2 metros de comprimento e são dispostas em espiral em torno de um caule que tem entre 25 e 50 cm de comprimento (Cheng; Bartholomew; Qin, 2018).

A planta produz uma inflorescência composta por várias flores individuais que se fundem para formar o fruto, conhecido como infrutescência. Cada flor do abacaxizeiro contribui com uma parte no fruto. A parte comestível consiste na fusão dos ovários, das bases das sépalas e brácteas, e do córtex do núcleo central. Enquanto a casca é composta por sépalas, tecidos das brácteas e os ápices dos ovários (Lobo; Paull, 2017).

Essa cultura apresenta uma demanda crescente por seus frutos no mercado e sua alta produtividade e qualidade dos frutos são fatores fundamentais para o seu sucesso econômico. Destaca-se pelo seu sabor doce e ácido, que o torna popular tanto para consumo in natura quanto para processamento industrial, sendo a variedade Pérola a mais cultivada e com maior aceitação no mercado nacional (Bonomo *et al.*, 2020).

Conforme os dados da FAO (2026), o Brasil encontra-se na quinta posição do ranking mundial. Em 2022 foram produzidas 2.337.301 toneladas de abacaxi no país, em uma área colhida de 64.147 hectares, resultando em rendimento médio de 24.29 kg ha⁻¹. A produção de abacaxi no Brasil está concentrada na região Norte e Nordeste, com aproximadamente 70% da produção nacional. Neste ranking, a região Nordeste lidera com uma participação de 34,9% da produção de abacaxi do Brasil, seguido pela região Norte com participação de 34,3% do total (IBGE, 2022).

Para um desenvolvimento ideal, o abacaxizeiro requer temperaturas entre 22°C e 32°C e uma precipitação anual de 1000 a 1500 mm, distribuída de forma relativamente uniforme ao longo do ano. A planta se desenvolve melhor em solos bem drenados, com pH entre 4,5 e 5,5, e ricos em matéria orgânica, o que favorece o crescimento das raízes e a absorção eficiente de nutrientes. O sistema radicular do abacaxizeiro é relativamente superficial, o que torna a planta dependente de uma umidade constante no solo (Reinhardt *et al.*, 2018).

Por se tratar de uma bromeliácea, o abacaxizeiro apresenta metabolismo ácido das crassuláceas (CAM), no qual a fixação de CO₂ ocorre predominantemente durante a noite, com abertura estomática noturna e estômatos tendendo a permanecer fechados durante o dia, o que reduz a perda de água por transpiração e confere elevada eficiência no uso da água em ambientes quentes e secos. Esse mecanismo utiliza um sistema de concentração de CO₂ com etapas enzimáticas semelhantes às das plantas C₄, o que contribui para maior eficiência fotossintética em condições de estresse hídrico (Niechayev; Pereira; Cushman, 2019).

Entretanto, estudos mostram que o abacaxizeiro apresenta metabolismo fotossintético flexível (C₃/CAM facultativo em fases jovens), ajustando a expressão do CAM em função de variáveis como disponibilidade hídrica, temperatura e intensidade luminosa. Assim, quando cultivado sob irrigação e em condições ambientais favoráveis, a planta pode reduzir a expressão típica de CAM e comportar-se fisiologicamente de forma mais semelhante a espécies de ciclo C₄, com maior contribuição da assimilação diurna de CO₂ e crescimento mais vigoroso (Couto *et al.*, 2016).

O abacaxizeiro produz diferentes tipos de mudas, como a coroa, o filhote, filhote-rebentão e rebentão. A propagação comercial do abacaxi é frequentemente realizada por meio de mudas do tipo filhote pois são produzidas em grande quantidade pelas plantas, apresentam desenvolvimento relativamente uniforme, facilitando a indução do florescimento e é um método de propagação vegetativa que garante a uniformidade genética e fenotípica das plantas cultivadas (Cheng; Bartholomew; Qin, 2018).

O ciclo de vida do abacaxizeiro, desde o plantio até a colheita, varia entre 18 a 24 meses, dependendo das condições ambientais e do manejo agrícola. O florescimento, geralmente é induzido por tratamentos hormonais como o uso do Ethephon, carbureto de cálcio, etileno e acetileno, para uniformizar ou antecipar a floração. Esses indutores possibilitam a escolha da época ideal em que as condições climáticas locais ou o momento sejam o mais propício para a comercialização dos frutos. No Brasil, o Ethephon é amplamente utilizado como indutor floral por ser um precursor do etileno, após a indução floral o fruto leva de 5 a 6 meses para se desenvolver e atingir o ponto de colheita (Carvalho *et al.*, 2005; Barker *et al.*, 2020).

2.2 Nutrição do abacaxizeiro

Diversos fatores influenciam o estado nutricional das plantas, como a disponibilidade de água e de nutrientes, o que pode afetar no seu desenvolvimento, produtividade, composição,

resistência de pragas e doenças, entre outros (Prado, 2020). No abacaxizeiro, os nutrientes mais exigidos são nitrogênio e potássio (Rodrigues *et al.*, 2013).

O nitrogênio desempenha múltiplas funções vitais no crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas. Constitui parte essencial de diversos componentes celulares, como aminoácidos e carboidratos (Prado, 2020). Além disso, o N está presente em compostos orgânicos cruciais, como proteínas e ácidos nucleicos, e desempenha um papel essencial na fotossíntese, por ser um componente da clorofila, o pigmento responsável pela absorção de energia luminosa (Taiz *et al.*, 2024).

Na ausência de nitrogênio, observa-se uma desaceleração no crescimento e uma redistribuição do nutriente das folhas mais antigas para os tecidos mais jovens da planta (Campos *et al.*, 2021). A deficiência de nitrogênio pode ser identificada por sintomas como o amarelamento precoce das folhas e uma clorose generalizada em folhas maduras (Prado, 2020).

O potássio desempenha papel fundamental como ativador enzimático em diversas vias metabólicas da planta, incluindo a fotossíntese, respiração, síntese de proteínas e regulação osmótica (Ragel *et al.*, 2019). Ele também atua diretamente na abertura e o fechamento dos estômatos, afetando a regulação do fluxo de água e nutrientes, bem como a troca gasosa nas folhas (Coskun; Britto; Kronzucker, 2017).

A falta de potássio pode resultar em problemas como a redução da eficiência fotossintética, menor resistência ao estresse hídrico e menor capacidade de resistir a doenças e pragas. Assim, a deficiência de potássio pode comprometer não apenas a função fotossintética, mas também a estrutura e a capacidade de adaptação das plantas a condições adversas (Srivastava *et al.*, 2020; Johnson *et al.*, 2022).

Apesar do abacaxi ser uma frutífera com características de rusticidade, ela requer uma adubação rica em matéria orgânica e nutrientes e deve contemplar, além da reposição de quantidades de N e K absorvidas pela planta e exportadas pelos frutos e mudas, o estabelecimento de relações adequadas entre as doses desses nutrientes. Em seu estudo, Rodrigues *et al.* (2013), identificaram que o aumento das relações K/N elevou o peso da folha 'D', os teores de K e os valores das relações K/N e K/Mg; reduziram os teores de N e não afetaram os teores de P, Ca e a relação K/Ca.

No estudo de Rodrigues *et al.* (2022) que buscou gerar valores de referência utilizando o diagnóstico da composição de nutrientes para maximizar a produtividade e a qualidade dos frutos de abacaxi 'Pérola' cultivado no estado da Paraíba, foi identificado que os níveis críticos de nutrientes foliares que promovem a máxima relação qualidade/produtividade são: N: 13; P: 1,4; K: 39; S: 1,3; Ca: 3,0 e Mg: 1,9 g kg⁻¹.

Ao avaliar a produtividade de abacaxi ‘Pérola’ sob fertirrigação em Espírito Santo, Bonomo *et al.* (2020) identificaram que uma aplicação de 516 kg ha⁻¹ de N proporcionou o maior diâmetro dos frutos. Já no estudo desenvolvido por Caetano *et al.* (2013) foi alcançado a produtividade de 65,0 t ha⁻¹ de abacaxi, com a aplicação de 647 kg ha⁻¹ de N.

Outro ponto de destaque, quando se fala de adubação, é o parcelamento do fertilizante ao longo do ciclo de crescimento da cultura, que permite uma disponibilização mais constante e eficiente dos nutrientes, atendendo às necessidades específicas das plantas em diferentes estágios de desenvolvimento. Nesse viés, é fundamental, principalmente, em áreas com solo arenoso, pois a fertilização com altas taxas de K nesse tipo de solo pode causar quedas severas na absorção de alguns macros e micronutrientes, devido sua baixa capacidade de troca de cátions, pois aumenta a competição entre eles (Silva *et al.*, 2021). Além disso, ocorre o desequilíbrio no acúmulo e balanço de nutrientes nas folhas (Volf *et al.*, 2022).

No abacaxi, o parcelamento da adubação pode ser fundamental para evitar a perda dos nutrientes por processos de lixiviação e garantir que a planta tenha acesso contínuo a eles. Nesse viés, o parcelamento pode contribuir para a melhoria da qualidade dos frutos, para o aumento da massa do fruto e, conseqüentemente, da produtividade, além de otimizar o uso dos fertilizantes e minimizar os impactos ambientais (Teixeira *et al.*, 2002).

2.3 Qualidade do fruto do abacaxi

A qualidade dos frutos de abacaxi é um parâmetro crucial tanto para o mercado interno quanto para a exportação. Diferentes estudos têm focado em parâmetros como acidez titulável, pH, sólidos solúveis (SS) e a relação entre sólidos solúveis e acidez titulável (SS/AT) para avaliar a qualidade destes frutos (Oliveira *et al.*, 2015a; Rios *et al.*, 2018b; Viana *et al.*, 2019; Cunha *et al.*, 2021).

A acidez dos frutos de abacaxi é uma característica fundamental que influencia diretamente o sabor e a aceitabilidade do produto pelo consumidor. A acidez é geralmente expressa em termos de ácido cítrico, e seus valores podem variar significativamente dependendo da cultivar e das condições de cultivo (Etienne *et al.*, 2013). Durante o desenvolvimento do fruto, a acidez aumenta e depois diminui na fase de amadurecimento, elevando o pH e a relação °Brix/AT, o que gera sabor mais doce e aceitável ao consumidor (Paull; Uruu; Chen, 2020).

Os sólidos solúveis (SS), frequentemente medidos em graus Brix, são indicativos do teor de açúcares no fruto e são um parâmetro crítico para determinar a doçura e,

consequentemente, a qualidade sensorial do abacaxi. Frutos com maior teor de sólidos solúveis são geralmente mais apreciados pelos consumidores devido ao seu sabor doce e agradável (Cunha *et al.*, 2021).

A relação entre sólidos solúveis e acidez titulável (SS/AT) fornece uma medida do equilíbrio entre a doçura e a acidez do fruto. Uma relação SS/AT mais alta é desejável, pois indica um fruto mais doce e menos ácido, características valorizadas tanto pelo mercado consumidor quanto pela indústria de sucos (Rios *et al.*, 2018b).

A vitamina C (ácido ascórbico) também é um parâmetro importante na avaliação da qualidade do abacaxi, por compor o perfil nutricional do fruto e contribuir para sua funcionalidade alimentar. Além de ser um antioxidante amplamente reconhecido, a vitamina C está associada a benefícios à saúde humana, como suporte ao sistema imune e participação em processos metabólicos essenciais, o que reforça a relevância de sua quantificação em frutos destinados ao consumo in natura e ao processamento (Sarkar *et al.*, 2020).

As proteínas totais dos frutos podem ser utilizadas como um indicador complementar de qualidade química e nutricional, por refletirem a fração nitrogenada presente na polpa e possíveis variações associadas ao metabolismo do fruto. Esse parâmetro pode sofrer influência da cultivar, do estágio de maturação e das condições de cultivo, sendo útil para uma avaliação mais abrangente da composição do abacaxi, especialmente quando se busca caracterizar mudanças na qualidade em resposta a práticas de manejo (Hayes, 2020).

Os açúcares totais representam uma medida mais direta do conteúdo de carboidratos do fruto e contribuem para caracterizar a composição da polpa sob a perspectiva do acúmulo de açúcares ao longo do desenvolvimento e amadurecimento. Esse atributo é relevante por se associar ao dulçor e ao potencial de aceitação sensorial do abacaxi, podendo variar conforme fatores genéticos e ambientais, bem como em função das condições de cultivo (Yue *et al.*, 2022).

2.4 Pigmentos fotossintéticos

A análise dos pigmentos fotossintéticos, como as clorofilas e os carotenoides, é uma ferramenta amplamente utilizada para avaliar o estado fisiológico e a capacidade fotossintética das plantas. As clorofilas, localizadas nas membranas dos tilacoides dos cloroplastos, são os principais pigmentos responsáveis pela absorção de energia luminosa, atuando como o centro do complexo antena (Taiz *et al.*, 2024).

A clorofila *a* é um pigmento primário dos centros de reação; participa diretamente na conversão da energia luminosa em energia química, enquanto a clorofila *b* atua como um pigmento acessório, localizado sobretudo nos complexos de coleta de luz, amplia o espectro de luz absorvida e transfere energia para a clorofila *a* (Taiz *et al.*, 2024). A quantificação desses pigmentos, portanto, oferece um indicativo direto da integridade do aparato fotossintético e do potencial produtivo da planta, uma vez que, a proporção entre clorofila *a* e *b* é indicador importante do estado fotossintético e adaptação de plantas a diferentes ambientes (Tantray; Bashir; Ahmad, 2020).

Sob condições de estresse abiótico, como estresse nutricional por N e K, a concentração de clorofilas tende a diminuir. Este declínio é frequentemente associado à foto-oxidação dos pigmentos, sendo um dos primeiros sintomas visíveis o amarelecimento foliar seguido de senescência foliar devido o dano celular ocorrido. A redução no teor de clorofila compromete a eficiência da fotossíntese e, conseqüentemente, o acúmulo de biomassa. Por essa razão, a medição dos teores de clorofila é considerada um indicador rápido e confiável do nível de estresse ao qual a planta está submetida (Sharma *et al.*, 2020; Tantray; Bashir; Ahmad, 2020).

Paralelamente às clorofilas, os carotenoides desempenham uma dupla função essencial para as plantas. Atuam como pigmentos acessórios na captação de luz, transferindo a energia absorvida para as clorofilas, mas sua função mais crítica sob estresse é a fotoproteção. Os carotenoides são capazes de dissipar o excesso de energia luminosa na forma de calor, através do ciclo das xantofilas, e de neutralizar espécies reativas de oxigênio (EROs), como o oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$), que são formadas em altas intensidades luminosas e podem causar danos severos ao aparato fotossintético (Peralta-Sánchez *et al.*, 2023). Assim, um aumento na razão carotenoides/clorofilas é frequentemente interpretado como um mecanismo de ajuste da planta para priorizar a fotoproteção em detrimento da captação de luz (Song; Wang, 2022).

2.5 Sistema antioxidante enzimático em plantas

Um dos principais desafios impostos pelo estresse abiótico é o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), como o ânion superóxido (O_2^-), o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$), radical peridroxil (HO_2^-) e o radical hidroxila (OH). Embora as EROs sejam subprodutos naturais do metabolismo aeróbico, sua produção exagerada sob estresse leva a um desequilíbrio redox conhecido como estresse oxidativo, causando danos a lipídios, proteínas, ácidos nucleicos e, em casos mais extremos, levando à morte celular (Ahanger *et al.*, 2015; Shams *et al.*, 2024).

Quando a planta sofre com a deficiência ou excesso de nitrogênio, a eficiência de utilização da energia luminosa diminui consideravelmente, o que resulta em um excesso de energia que inevitavelmente aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), gerando estresse oxidativo e danos aos lipídios das membranas celulares. Como resposta para combater e desintoxicar a planta desse estresse, ocorre uma forte ativação de enzimas antioxidantes. Vale ressaltar que a ausência de N também reduz diretamente a atividade de enzimas vitais ligadas à assimilação de nitrogênio e ao metabolismo de aminoácidos, prejudicando o crescimento da planta (Chen *et al.*, 2024).

A adubação deficiente em potássio rompe o equilíbrio entre a produção de ROS e o sistema de defesa antioxidante, o que também desencadeia um severo estresse oxidativo nas folhas. A falta prolongada desse nutriente leva a um acúmulo excessivo de radicais livres, resultando na degradação da clorofila e em danos severos às estruturas celulares. Para sobreviver a esse estresse oxidativo induzido pela deficiência de potássio, plantas mais tolerantes regulam sua homeostase estimulando significativamente a ativação de enzimas de defesa antioxidante, que trabalham em conjunto para eliminar os radicais tóxicos (Du *et al.*, 2019).

A defesa antioxidante enzimática é essencial para mitigar os efeitos deletérios dos radicais livres durante processos fisiológicos como amadurecimento e exposições estressantes. As enzimas SOD, CAT e APX têm papéis complementares no sistema antioxidante, a SOD catalisa a dismutação de superóxido em H_2O_2 ; CAT e APX removem o H_2O_2 , mantendo o equilíbrio redox. Embora esses mecanismos tenham sido estudados em diversos modelos vegetais, sua base bioquímica é amplamente reconhecida como universal (Anjum *et al.*, 2016; Rajput *et al.*, 2021).

A expressão e atividade dessas enzimas aumentam sob estresse nutricional, protegendo células vegetais contra danos oxidativos. A regulação pode envolver mecanismos genéticos, como a ação de miRNAs, e variações na expressão gênica conforme o tipo e intensidade do estresse. A predominância de cada enzima pode variar conforme o tecido, espécie e condição ambiental, mas a atuação conjunta é indispensável para a homeostase redox (Tewari; Kumar; Sharma, 2007; Corpas; González-Gordo; Palma, 2024). O sistema antioxidante enzimático ajusta-se via aumento da expressão de isoformas enzimáticas que neutralizam o dano oxidativo, o que contribui para manter a fotossíntese e a integridade celular (Pandey *et al.*, 2017; Mishra *et al.*, 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na área experimental do Grupo de Estudos em Fruticultura (Frutagro), no Departamento de Fitotecnia, do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Piauí (CCA/UFPI), durante os meses de outubro de 2022 a fevereiro de 2024, em Teresina – PI, a $5^{\circ}05'21''\text{S}$ e $42^{\circ}48'07''\text{O}$, e 72 m de altitude. (Figura 1).

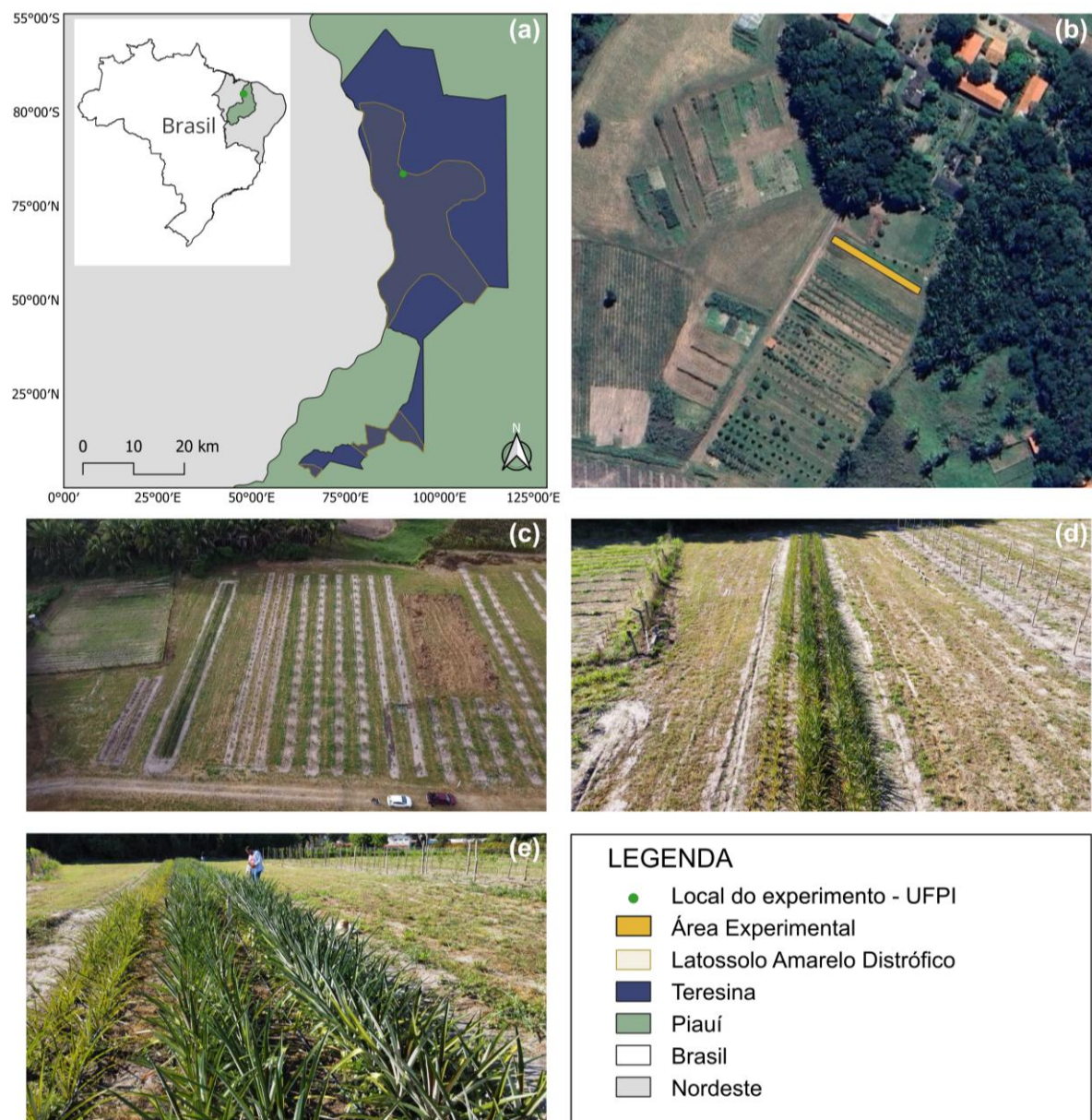


Figura 1 - Mapa de localização (a); área experimental no Departamento de Fitotecnia do O clima do município, de acordo com Koppen, é classificado como clima tropical. Os dados climáticos referente ao período de execução do experimento estão expostos na Figura 2,

onde pode-se observar a distribuição pluviométrica ao longo do experimento que atingiu a o total de 1451 mm, a temperatura média do período foi de 27,72 °C e a média da umidade relativa do ar no período foi de 71,15%.

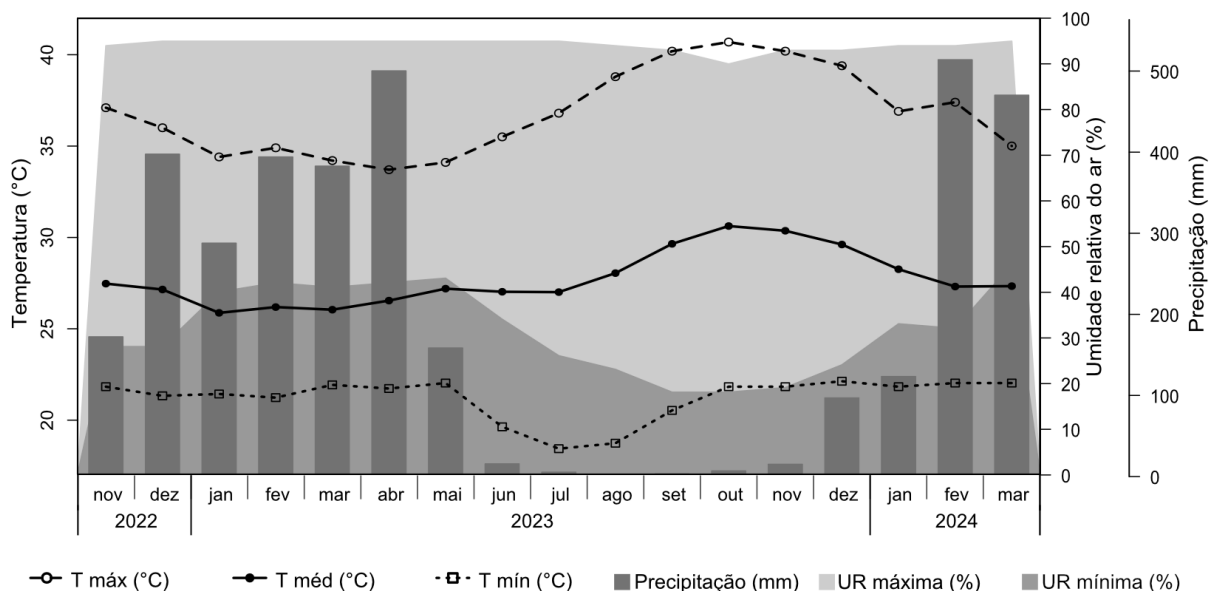


Figura 2 - Médias mensais da temperatura mínima, média e máxima do ar (°C); umidade relativa mínima e máxima do ar (%) e precipitação pluviométrica (mm) durante o período de condução do experimento, em Teresina-PI. Fonte: o autor.

3.2 Aquisição das mudas

Foram utilizadas mudas de abacaxi do tipo filhote, retirado da brotação que surge na base dos frutos, aos 90 dias após a colheita, adquiridas junto aos produtores do município de São Domingos do Maranhão – MA (Figura 3). As mudas permaneceram em ambiente protegido por 15 dias, diante da necessidade de aclimação às condições climáticas locais, sendo avaliadas as condições de fitossanidade antes de serem levadas ao campo.

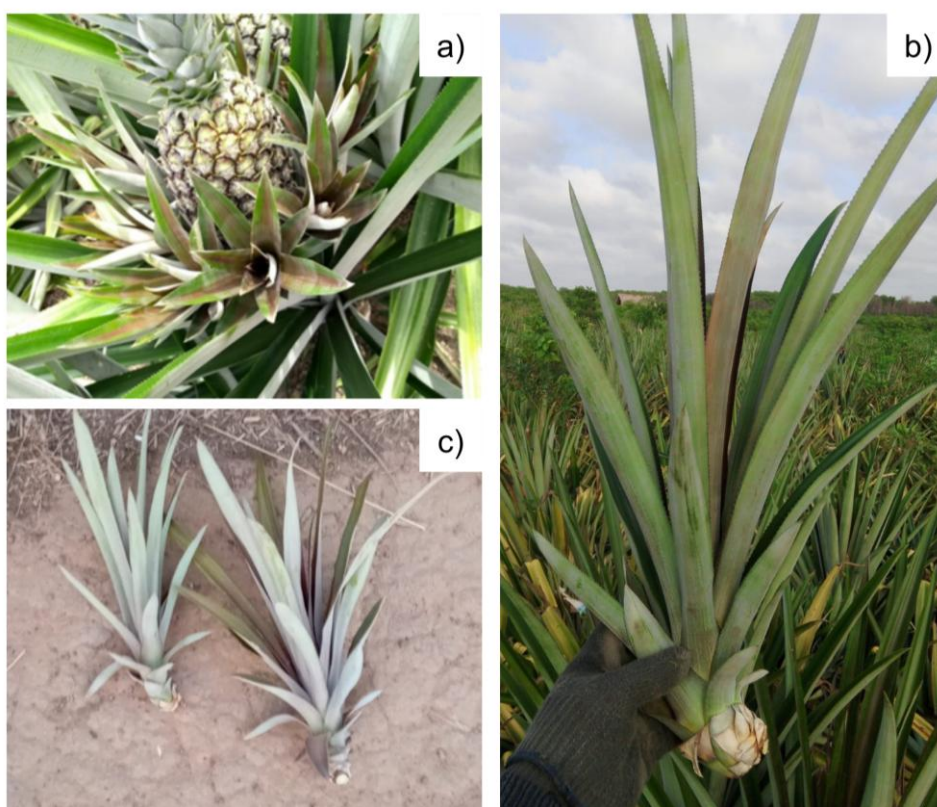


Figura 3 - Planta de abacaxizeiro com brotações do tipo filhote na base do fruto, provenientes de área de cultivo comercial no município de São Domingos do Maranhão - MA (a); muda do tipo filhote destacada da planta-mãe aos 90 dias após a colheita do fruto (b); muda após o período de cura, pronta para o transplante e implantação do experimento (c). Fonte: o autor.

3.3 Preparo do solo, plantio e irrigação

Procedeu-se com o preparo do solo a partir da aração e gradagem, seguida da abertura de sulcos a uma profundidade de 20 cm utilizando sulcador mecanizado (Figura 4a). Foram selecionadas as mudas saudáveis e distribuídas de forma manual em fileiras duplas (Figura 4b), obedecendo ao espaçamento para a cultura do abacaxizeiro de $0,90 \times 0,40 \times 0,40$ m, totalizando uma densidade populacional de 38.461 plantas por hectare.

Utilizou-se sistema de irrigação localizado por gotejamento, com dois emissores por planta. A linha principal foi composta por tubo PVC de diâmetro nominal (DN) de 50 mm e linhas laterais com fita gotejadora de polietileno com DN de 16 mm, medindo 62 m de comprimento (Figura 4c). A vazão do emissor especificada pelo fabricante é de $1,7 \text{ L h}^{-1}$ para uma pressão de serviço de 1,0 bar e apresentou eficiência de 87,81% e coeficiente de uniformidade (CU) de 97,57%.

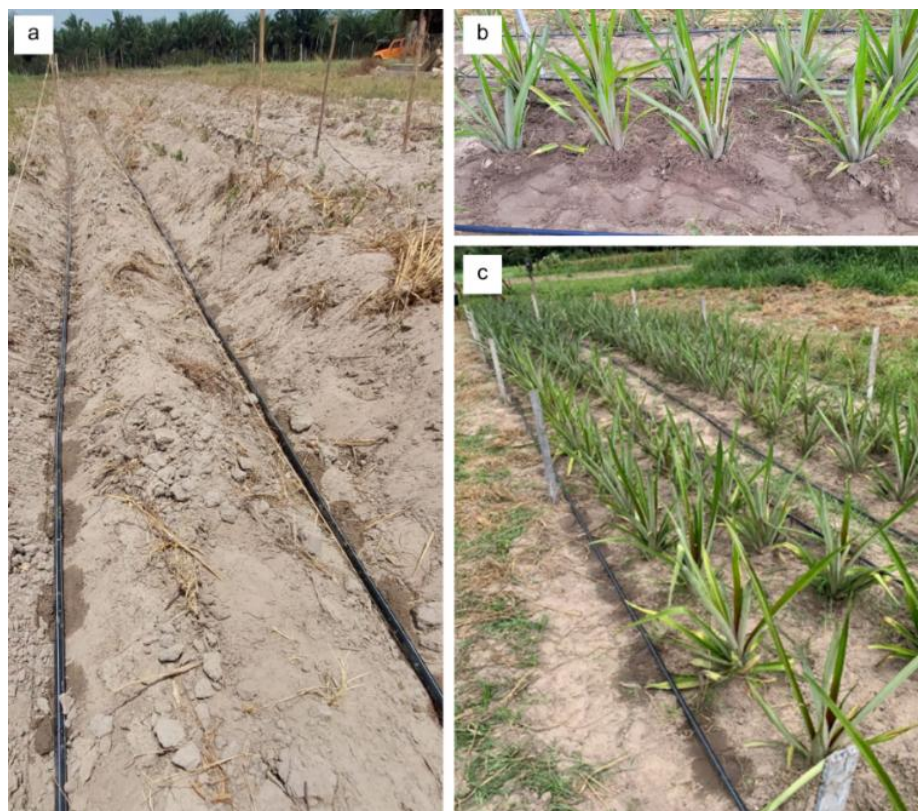


Figura 4 - Imagens ilustrando o sulco realizado para o plantio dos abacaxizeiros (a); mudas de abacaxizeiro recém-plantadas (b) e detalhes do sistema de irrigação localizada por gotejamento (c). Fonte: o autor.

3.4 Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), com 8 tratamentos e 4 repetições, em arranjo fatorial 4×2 , correspondendo a quatro níveis de nitrogênio (0; 160; 320; e 640 kg ha⁻¹ de N) e dois níveis de potássio (240 e 480 kg ha⁻¹ de K₂O). Cada unidade experimental foi constituída por 12 plantas cultivadas, sendo oito na área útil, totalizando 384 plantas no experimento (Figura 5). O nível de 320 kg ha⁻¹ de N e 480 kg ha⁻¹ de K₂O corresponde a quantidade de N e K recomendada para a cultura do abacaxizeiro irrigado em regiões semiáridas (Borges, 2021), definido a partir da análise do solo da área experimental detalhado na Tabela 1. A partir dessa dose de referência, foram estabelecidas as demais doses do experimento por incrementos proporcionais, contemplando níveis abaixo e acima do recomendado, de modo a compor a faixa de variação avaliada para N e K₂O (Tabela 2).

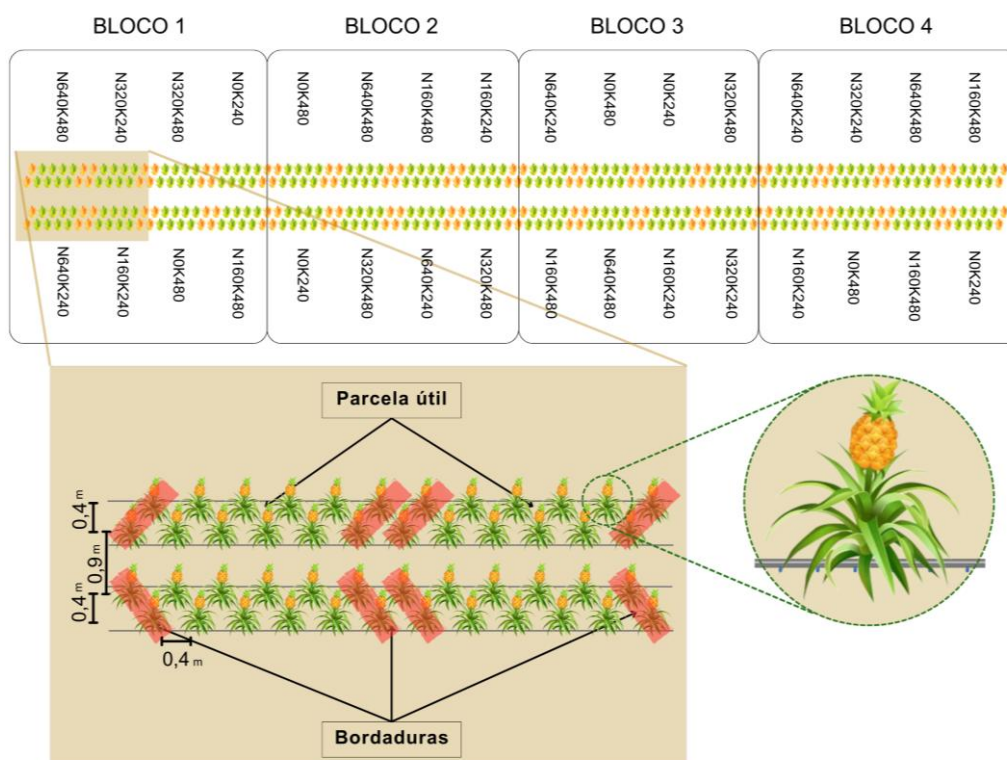


Figura 5 - Croqui do pomar de abacaxizeiro implantado para a condução do experimento, indicando a disposição de cada tratamento em cada bloco. Os códigos identificam os 8 tratamentos, conforme a combinação das quatro doses de N e duas doses de K. Detalhes da disposição das plantas em fileira dupla e seu espaçamento, compondo a parcela útil e as bordaduras de cada fileira. Fonte: o autor.

Considerando o pH e a saturação por bases de 67,9%, não foi necessário a aplicação de calcário, uma vez que os valores estão dentro da faixa ideal para o cultivo do abacaxizeiro. A exigência de fósforo foi suprida com aplicação de 80 kg ha^{-1} de P_2O_5 utilizando a fonte superfosfato simples (18% P_2O_5), conforme a necessidade determinada pela análise do solo (Tabela 1) e a recomendação de adubação para a cultura do abacaxi (Borges, 2021).

Tabela 1 - Análise de solo nas camadas de 0 - 20 cm na área experimental antes da implantação do experimento

do Experimento											
Camada	pH	H + Al ³⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	T	P	K	S
	H ₂ O	cmol _c dm ⁻³					mg dm ⁻³				
	5,5	0,75	0	1	0,54	0,04	1,58	2,33	10,7	15,64	-
0-20	V	m	M.O		Argila		Silte		Areia		
	%		g kg ⁻¹								
	67,9	0	4,19		104		45		851		

O manejo da adubação foi realizado conforme detalhado na Tabela 2. Foram utilizadas as fontes de ureia (45% N) e KCl (60% K₂O), para N e K respectivamente. Para garantir a homogeneidade da adubação obedecendo os tratamentos, foi previamente pesado e separado em sacos plásticos a quantidade necessária das fontes de N e K₂O que foram aplicados manualmente na base de cada unidade experimental (Figura 6).

Tabela 2 - Doses de ureia e KCl aplicados em cobertura, de forma parcelada, na cultura do abacaxizeiro em função dos tratamentos

Época de adubação (DAT)	Ureia (45% N)				KCl (60% K ₂ O)	
	----- kg ha ⁻¹ -----				-----	
	0	356	712	1423	400	800
----- g planta ⁻¹ -----						
60	0	1,73	3,47	6,93	1,95	3,90
150	0	2,31	4,62	9,24	2,60	5,20
210	0	2,60	5,20	10,40	2,93	5,85
270	0	2,60	5,20	10,40	2,93	5,85
Total	0	9,24	18,49	36,98	10,40	20,80



Figura 6 - Pesagem das quantidades de ureia (a) e cloreto de potássio (KCl) (b); embalagem com os adubos pesados e separados para aplicação em cada unidade experimental (c); Aplicação das doses de ureia e KCl na base da planta (d). Fonte: o autor.

3.5 Método, época e fonte para indução floral

A época ideal para indução floral no abacaxizeiro foi determinada a partir da data definida para colheita, levando-se em consideração o vigor das plantas. Dessa forma, a indução floral foi realizada aos 360 DAT, mediante aplicação do produto comercial Ethrel® 720. Procedeu-se o preparo seguindo as recomendações do fabricante do produto, levando em conta o período e área de aplicação. Foi utilizada proporção de 1,3 L do produto comercial para o volume de calda de 175 L/ha, adicionado de 2% de ureia na calda de pulverização. Foi pulverizado 30 mL da calda no centro da roseta foliar, com auxílio de um pulverizador costal às 04:30 h da manhã (Santana *et al.*, 2004). Com 45 dias após a indução floral foi observado a emissão das inflorescências.

3.6 Controle de plantas infestantes, pragas e doenças

O controle de plantas infestantes foi realizado mensalmente, de forma manual, com auxílio de enxada, evitando injúrias ao sistema radicular do abacaxizeiro (Figura 7a). Após a capina, a vegetação morta foi mantida nas entrelinhas, realizando-se amontoa do solo ao redor da planta para estimular a formação de raízes adventícias e evitar o tombamento das plantas.

Durante o período experimental, foi realizado monitoramento constante de pragas e doenças, mas não foram registrados ataques ou incidências significativas. Para minimizar danos por queimaduras de sol e preservar a qualidade externa dos frutos, foi realizada cobertura dos frutos com papel sulfite (Figura 7b), durante a fase de desenvolvimento e maturação, sempre que necessário.



Figura 7 - Área de cultivo do abacaxizeiro após capina realizada (a), papel sulfite enrolado no fruto para evitar injúrias causadas por insolação (b). Fonte: o autor.

3.7 Colheita

A colheita foi realizada ao final do experimento, em fevereiro de 2024 (480 DAT), quando os frutos apresentaram casca com coloração verde amarelado na base, indicando o estágio de maturação comercial do abacaxi. Os frutos foram acondicionados em sacolas plásticas de 50 × 60 cm identificadas de acordo com os tratamentos e encaminhados ao laboratório para realização das avaliações.

3.8 Variáveis analisadas

3.8.1 Parâmetros fisiológicos

Para a quantificação dos pigmentos fotossintéticos, utilizou-se a folha diagnóstica do abacaxizeiro, (folha “D”), correspondente à terceira folha mais jovem completamente expandida, contada a partir do centro da roseta, antes da indução floral, aos 360 DAT, quando as plantas apresentavam plena formação (Borges, 2021). De cada folha foram retirados três discos foliares de 1 cm de diâmetro do terço médio da folha, os quais foram acondicionados em tubos escuros contendo 5 mL de acetona 80% (v/v). As amostras permaneceram em repouso sob refrigeração ($\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) por 48 horas, até a completa extração dos pigmentos.

As leituras da densidade óptica foram realizadas em espectrofotômetro nos comprimentos de onda de 470, 645 e 663 nm. Após a extração, os discos foliares foram secos em estufa a $65 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas, para obtenção da massa seca.

Os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides foram expressos em $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca, calculados conforme proposto por Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987).

3.8.2 Parâmetros bioquímicos

O sistema enzimático antioxidante foi avaliado por meio da atividade específica das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e guaiacol peroxidase (G-POD). As análises foram realizadas em tecidos foliares e radicular do abacaxizeiro. Nas folhas, foi utilizado uma seção de 10 cm do terço médio da folha “D”, descartando as bordas com espinhos. Nas raízes, foram selecionadas raízes jovens, de menor diâmetro e coloração clara, por apresentarem maior sensibilidade às variações nutricionais e maior atividade do sistema antioxidante. O material vegetal foi acondicionado em papel

alumínio, identificado conforme os respectivos tratamentos e mantido congelado para preservação até a realização das análises.

Para a preparação do extrato enzimático, pesou-se 1 g do tecido fresco, que foi transferido para um almofariz de porcelana acondicionado sobre gelo moído. As amostras foram maceradas em nitrogênio líquido até obtenção de um pó homogêneo, ao qual foram adicionados 5 mL de tampão fosfato de potássio 0,1 M, contendo EDTA 0,1 mM (pH 7,0), previamente resfriado, e homogeneizado cuidadosamente por 10 minutos em temperatura controlada. O homogeneizado foi mantido a 4 °C durante todo o procedimento e transferido para dois tubos Eppendorf de 2 mL, sendo posteriormente centrifugado a 12.000 x g por 15 minutos a 4 °C. O sobrenadante obtido foi armazenado a -80 °C, dividido nos dois tubos, até a realização dos ensaios de atividade enzimática.

A atividade de SOD foi determinada conforme Giannopolitis e Ries (1977), pela quantidade de enzima capaz de inibir em 50% a fotorredução do NBT a 560 nm. A APX foi avaliada segundo Nakano e Asada (1981), medindo-se a taxa de oxidação do ascorbato a 290 nm. A CAT foi determinada de acordo com Havir e McHale (1987), pelo consumo de H₂O₂ a 240 nm, enquanto a G-POD foi determinada conforme Urbanek e Kuzniak-Gebarowska (1991) quantificada utilizando guaiacol como substrato, monitorando-se o aumento da absorbância a 470 nm decorrente da formação de tetraguaiacol. O conteúdo de proteínas solúveis foi determinado conforme Bradford (1976), sendo utilizado para normalização das atividades enzimáticas.

3.8.3 Parâmetros nutricionais

3.8.3.1 Teor foliar de macronutrientes

Para determinação do teor foliar dos macronutrientes, foram coletadas folhas “D” do abacaxizeiro antes da indução floral, aos 360 DAT. O material foi conduzido ao Laboratório de Produção Vegetal, do Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-açúcar (PMGCA/RIDES), e lavado com água destilada para posterior secagem em estufa com circulação forçada de ar (Modelo 400ND) à 65 °C até atingir massa constante (aproximadamente 72 horas). Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho de facas tipo Willey e enviadas ao Laboratório de Solos do CPCE/UFPI, para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg e S conforme descrito por Silva (2009).

3.8.3.2 Eficiência nutricional

Aos 360 DAT uma planta de cada unidade experimental foi utilizada para avaliação da eficiência nutricional. Foi feita a retirada da planta com auxílio de uma pá e realizada a separação das raízes e da parte aérea das plantas com o uso de tesoura de poda. Foi feita a lavagem do sistema radicular com água corrente; água com detergente neutro (1,0 mL/L); ácido clorídrico (3,5 mL/L) e água destilada, respectivamente. Em seguida, o material vegetal fresco (parte aérea e raízes) foi seco em estufa de circulação e renovação de ar (Modelo SL – 102) a 65 ± 5 °C, até massa constante que foi atingida em aproximadamente 72 horas.

A obtenção da massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca radicular (MSR) das plantas foi obtida usando balança analítica (Modelo M214Ai, 0,01 g). O material seco foi moído em moinho de facas tipo Willey e determinado os teores de N, P, K, Ca, Mg e S, de acordo com a metodologia proposta por Silva (2009). Baseado no teor do nutriente e na massa seca da parte aérea e raízes, foi determinado o acúmulo de cada macronutriente na parte aérea e nas raízes das plantas de abacaxizeiro. Com esses dados, foi calculado as eficiências de absorção, translocação e uso de N, P, K, Ca, Mg e S (Prado, 2020).

3.8.4 Parâmetros de crescimento vegetativo

Aos 360 DAT, na folha D foram mensurados com fita métrica o comprimento (CF) compreendido da extremidade até a base foliar e largura (LF) no terço médio.

3.8.5 Parâmetros de produção

Após a colheita os frutos de abacaxi foram encaminhados ao Laboratório de Recursos Genéticos e Melhoramentos de Plantas (RGMP) para avaliação da massa do fruto com coroa (MFCC) (Figura 8a) e massa do fruto sem coroa (MFSC) (Figura 8b), com auxílio de balança digital de mesa.

A produtividade foi estimada a partir da massa média do fruto com coroa, multiplicada pela densidade populacional do cultivo, expressa em número de plantas por hectare, sendo os resultados apresentados em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$). O rendimento de polpa foi determinado pela relação entre a massa da polpa e a massa do fruto com casca e sem coroa, expresso em porcentagem.

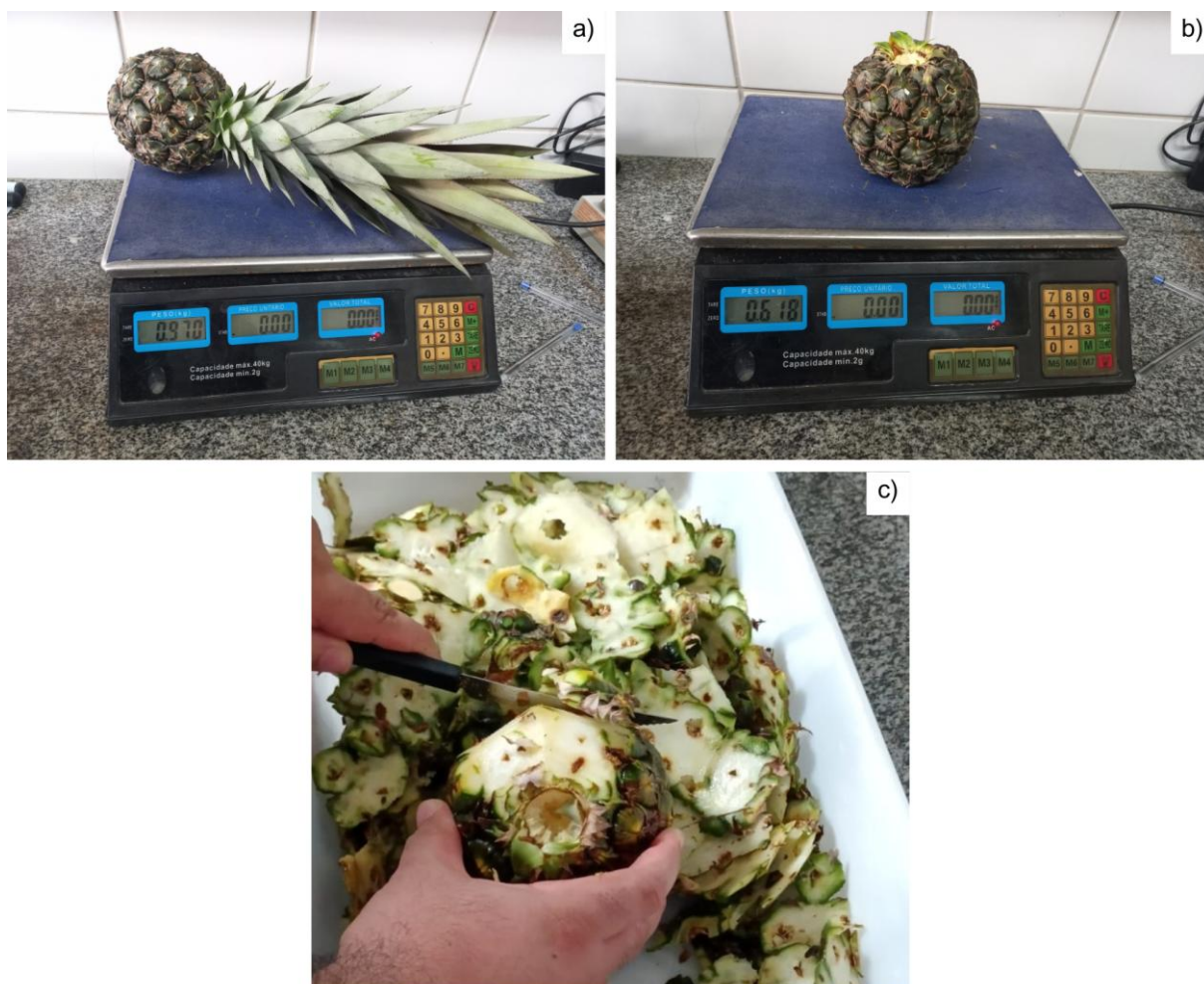


Figura 8 - Pesagem da massa do fruto com coroa (a) e da massa do fruto sem coroa (b) em balança digital de mesa; retirada da casca para mensuração do rendimento de polpa e realização das análises químicas subsequentes (c). Fonte: o autor.

3.8.6 Parâmetros de qualidade do fruto

As avaliações de qualidade do fruto foram realizadas no laboratório de frutas do Núcleo de Processamento de Produtos Alimentícios (NUEPPA). Foram constituídas de análises químicas nos frutos de cada tratamento e repetição, os quais foram descascados, triturados até a homogeneidade com auxílio de liquidificador e sua polpa avaliada em triplicata.

O pH foi mensurado com um peagâmetro digital, modelo PHS-3C usando 5 g das amostras de abacaxi diluídos em 50 mL de água destilada, após a inserção do eletrodo na amostra, aguardou-se a estabilização da leitura e anotou-se o valor (Figura 9a).

A acidez titulável (AT) foi determinada pelo método de volumetria com indicador (Figura 9b), utilizou-se a mesma amostra da análise do pH, adicionada de duas gotas de solução de fenolftaleína e prosseguiu-se com a titulação com solução de hidróxido de sódio com

concentração de 1,0 M, sob agitação constante, até coloração rósea persistente (Instituto Adolfo Lutz, 2008).

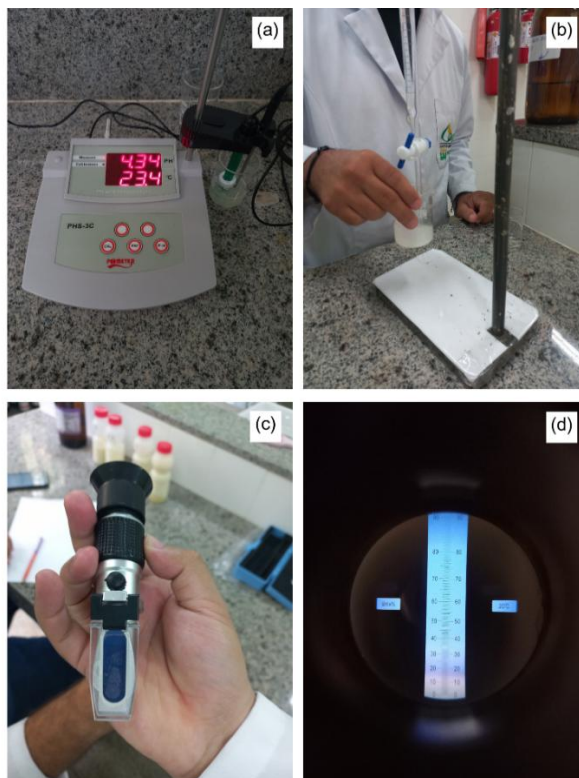


Figura 9 - Medição do pH (a), titulação para determinação de acidez titulável (b), amostra em refratômetro para análise de sólidos solúveis (c), e observação no refratômetro (d) do resultado em °Brix das amostras de polpa de frutos de abacaxi. Fonte: o autor.

Os sólidos solúveis (SS) foram mensurados com auxílio de refratômetro portátil, adicionando-se duas gotas de amostras da polpa do abacaxi, após aferir sua temperatura com termômetro digital (Figura 9c e Figura 9d). Quando a temperatura da amostra diferiu de 20 °C, foi corrigida a leitura dos sólidos solúveis, em relação à temperatura observada, de acordo com a tabela de correção de temperatura da amostra, para obter o valor real do Brix (Instituto Adolfo Lutz, 2008). A relação SS/AT foi calculada a partir dos valores obtidos das análises de sólidos solúveis e acidez titulável.

O teor de vitamina C (ácido L-ascórbico) foi determinado conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (2008), baseado na oxidação do ácido ascórbico pelo iodato de potássio. 15 g das amostras de polpa do fruto, previamente homogeneizadas, foram adicionados em um frasco Erlenmeyer com 50 mL de água destilada, 10 mL de ácido sulfúrico a 20%, 1 mL de solução de iodeto de potássio a 10% e 1 mL de solução de amido a 1%. Foram e submetidas à titulação com solução de iodato de potássio 0,002 M, até o surgimento de coloração azul

persistente. As determinações foram realizadas em triplicata, acompanhada de uma prova em branco.

O teor de proteínas totais foi determinado utilizando o método de Kjeldahl, conforme Instituto Adolfo Lutz (2008). 1 mL da amostra foi adicionado em tubo de digestão de borossilicato com 2 g mistura digestora, e 5 mL de ácido sulfúrico, aquecido à 400 °C por 4 h. Depois que a temperatura baixou, foi adicionado 20 mL de água destilada e o tubo levado ao conjunto de destilação e adicionado 25 mL de solução de NaOH a 50%.

Um Erlenmeyer contendo 20 mL de solução de ácido bórico (40 g/L), adicionado das soluções alcoólicas vermelho de metila e verde de bromocresol, foi acrescentado ao conjunto de destilação para receber a amônia destilada até atingir volume de 100 mL. Em seguida foi feita titulação com HCl 0,05 N até mudança da coloração verde para rosa claro. Os resultados foram expressos em mg de proteína por 100 g de polpa fresca.

O teor de açúcares totais foi determinado conforme Instituto Adolfo Lutz (2008). Inicialmente, foi pesado 2 g da amostra previamente homogeneizada e transferido para balão volumétrico de 100 mL com auxílio de água destilada. A amostra foi acidificada com 1 mL de ácido clorídrico e submetida a banho-maria a 100 ± 2 °C por um período de 30 a 45 minutos, promovendo a conversão de açúcares não redutores em açúcares redutores. Após o resfriamento, a solução foi neutralizada até pH próximo da neutralidade. Em seguida, o volume foi completado com água destilada e a solução homogeneizada.

Para a quantificação, o extrato foi transferido para uma bureta. Em um Erlenmeyer de 250 mL foram adicionados 10 mL das soluções de Fehling A e Fehling B, acrescidos de 40 mL água destilada e a mistura foi aquecida até ebulição. A solução da amostra na bureta foi então adicionada lentamente, sob ebulição e agitação, até o desaparecimento da coloração azul e a formação de precipitado vermelho de óxido cuproso (Cu_2O).

O teor de açúcares totais calculado teve os resultados expressos em g por 100 g de polpa fresca.

3.9 Análise estatística

3.9.1 Análise de variância e regressão

Os dados foram avaliados quanto a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade de variância pelo teste de Bartlett, independência dos erros por análise gráfica dos resíduos e após cumpridos esses requisitos submetidos à análise de variância

(ANOVA). Para o fator doses de N, foi aplicada a análise de regressão ($p < 0,05$). Para o fator doses de K_2O , considerou-se o resultado da anova ($p < 0,05$).

3.9.2 Análise de componentes principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para explorar as relações entre as variáveis avaliadas e os tratamentos. Como as variáveis apresentam escalas distintas, os dados foram padronizados por meio da transformação Z-score, conforme recomendado por Cao, Williams e Williams (1999). A PCA reduz o conjunto original de variáveis correlacionadas a componentes principais ortogonais, selecionados com base em autovalores superiores a 1 e na variância explicada cumulativa. Os escores obtidos permitiram a construção de gráficos bidimensionais, enquanto as cargas fatoriais indicaram as variáveis que mais contribuíram para a discriminação dos tratamentos (Hair Junior *et al.*, 2009).

3.9.3 Rede de correlação

Complementarmente à PCA, foi realizada a análise de rede de correlação para investigar as associações entre as variáveis fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e produtivas do abacaxizeiro e identificar padrões de interdependência do sistema. As correlações foram estimadas pelo coeficiente de Pearson, considerando apenas associações estatisticamente significativas ($p < 0,05$) (Siriwardana *et al.*, 2025).

3.9.4 Otimização multivariada por função de desejabilidade

A otimização multivariada das doses de N e K_2O foi conduzida por meio da função de desejabilidade (Derringer; Suich, 1980), que permite integrar múltiplos objetivos, frequentemente conflitantes, em um único critério de otimização. Com base nos resultados da Análise de Componentes Principais, foram selecionadas 12 variáveis com resposta quadrática à adubação nitrogenada e potássica, representando os dois primeiros componentes principais (Thorisingam; Mustafa, 2022).

As equações de regressão obtidas nas análises individuais de cada variável foram utilizadas para estimar os valores preditos nas diferentes combinações de doses de N e K_2O avaliados. Para cada variável, estabeleceram-se coeficientes de desejabilidade individual variando de 0 (completamente indesejável) a 1 (completamente desejável). Para cada variável,

definiu-se uma função de desejabilidade individual, especificando se o objetivo foi maximizar, minimizar ou atingir um valor-alvo. A desejabilidade global foi calculada como a média geométrica das 12 desejabilidades individuais.

3.9.5 Recursos computacionais

As análises estatísticas e gráficos foram realizadas no software R versão 4.5.2 (R Core Team, 2025), utilizando os pacotes: ExpDes.pt versão 1.2.2 (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2014) para análise de dados experimentais; FactoMineR versão 2.12 (Le; Josse; Husson, 2008); qgraph versão 1.9.8 (Epskamp *et al.*, 2012) para rede de correlação; desirability versão 2.1 (Kuhn, 2016) para otimização multivariada e ggplot2 versão 3.5.1 (Wickham, 2016) para elaboração dos gráficos.

4 RESULTADOS

4.1 Parâmetros de crescimento vegetativo

A interação entre as doses de nitrogênio e potássio ($N \times K$) não foi significativa ($p > 0,05$) para nenhuma das variáveis analisadas. Diante da ausência de interação, os efeitos dos fatores foram estudados isoladamente. O fator nitrogênio exerceu efeito significativo sobre a MSPA e CF, indicando que essas variáveis respondem à adubação nitrogenada independentemente das doses de potássio aplicadas. Para a MSPA, não houve resposta estatística à variação das doses de K_2O (Tabela 3). Por outro lado, o fornecimento de Potássio influenciou significativamente a MSR, o CF e a LF. Nota-se que a variável CF foi a única a responder significativamente a ambos os nutrientes de forma isolada (Tabela 3).

Tabela 3 - Resumo da análise de variância da massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), comprimento da folha diagnose (CF) e largura da folha diagnose (LF) de plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K_2O

F.V.	G.L.	MSPA (g por planta)	MSR (g por planta)	CF (cm)	LF (cm)
Quadrado médio					
Bloco	3	1.560,67 ^{ns}	13,85 ^{ns}	1,52 ^{ns}	6,79 ^{ns}
N	3	10.481,00 ^{***}	3,75 ^{ns}	165,79 ^{***}	0,10 ^{ns}
K	1	1.436,00 ^{ns}	71,28 [*]	157,09 ^{**}	0,81 [*]
K: 240		179,87a	9,10a	81,76b	5,01b
K: 480		193,27a	6,11b	86,19a	5,32a
Quadrado médio					
$N \times K$	3	2.150,67 ^{ns}	15,81 ^{ns}	38,64 ^{ns}	0,26 ^{ns}
Resíduo	21	852,85	9,65	18,21	0,14
C.V. (%)		15,65	40,83	5,08	7,27

^{ns}, ^{***}, ^{**}, ^{*}, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

Para a MSPA, observou-se ajuste linear crescente em função das doses de nitrogênio (Figura 10a). Estima-se que, para cada $kg\ ha^{-1}$ de N adicionado ao solo, houve um incremento de 0,124 g na massa seca da planta. Em contrapartida, a MSR não foi influenciada pelas doses de N (Figura 10b), apenas pelo potássio, onde observou-se comportamento inverso ao aumento da adubação. A elevação da dose de 240 para 480 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O resultou em uma redução de 32,8% na biomassa radicular (Tabela 3). Esse resultado sugere que a dose mais elevada de

potássio pode ter causado algum efeito depressivo no desenvolvimento radicular, possivelmente associado ao efeito salino ou desbalanço nutricional na rizosfera.

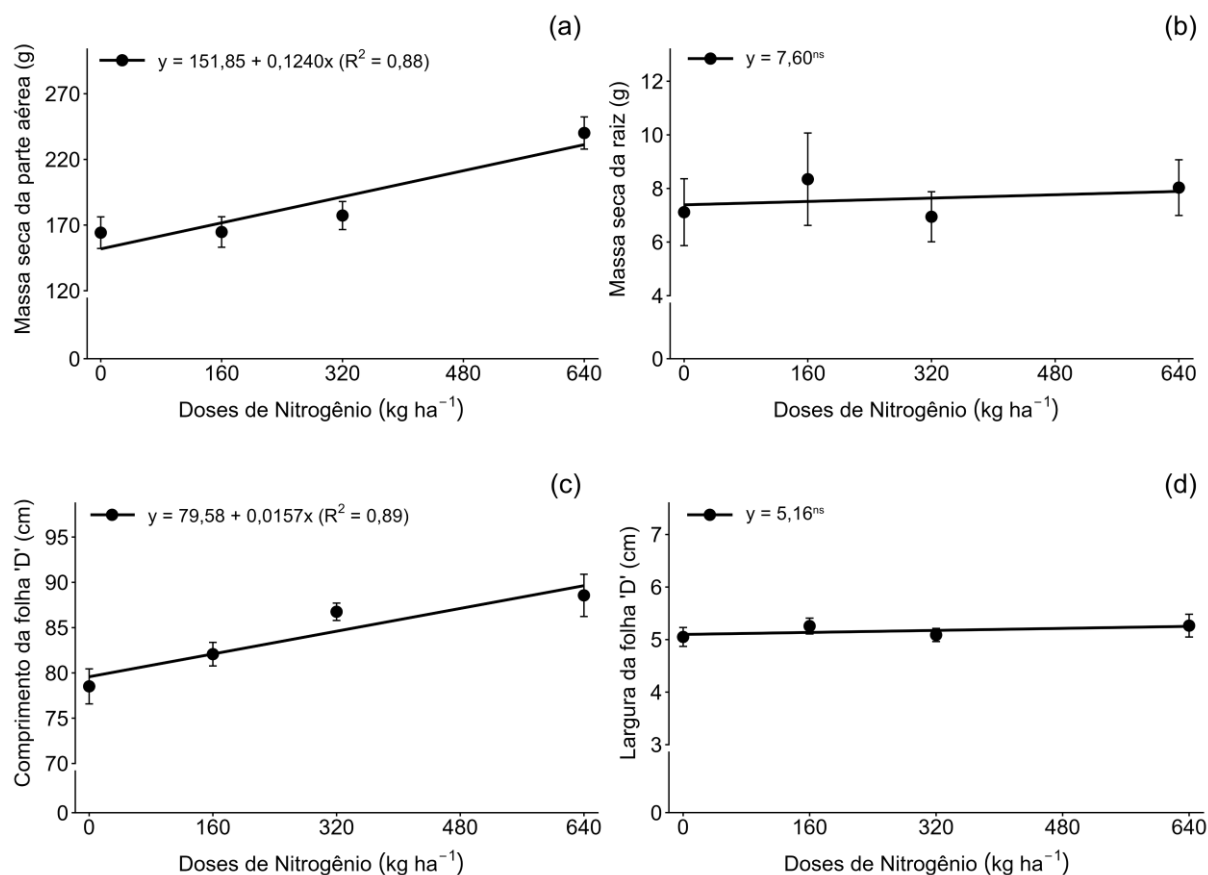


Figura 10 - Massa seca da parte aérea (a); massa seca da raiz (b); comprimento da folha 'D' (c) e largura da folha 'D' (d) de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a doses de N aplicado em cobertura. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

O comprimento da folha respondeu tanto ao nitrogênio quanto ao potássio. Em relação ao nitrogênio, o CF ajustou-se ao modelo linear positivo (Figura 10c), com ganho estimado de 0,015 cm por kg ha⁻¹ de N aplicada ($R^2 = 0,89$). Já a LF não apresentou resposta em função das doses de N (Figura 10d). Quanto ao efeito do potássio, diferentemente do observado nas raízes, o incremento na adubação favoreceu o desenvolvimento foliar. As plantas submetidas à dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O apresentaram ganhos de 5,4% no comprimento e 6,2% na largura das folhas em comparação àquelas cultivadas com a menor dose do nutriente (Tabela 3).

4.2 Parâmetros nutricionais

4.2.1 Teor foliar e acúmulo de macronutrientes

Observou-se interação entre as doses de N e K₂O para o P e S. Para os demais macronutrientes, analisaram-se os efeitos isolados. O N influenciou os teores de N, K e Ca. Já o K₂O exerceu efeito sobre os teores de N e K. O teor foliar de Mg não apresentou efeito em nenhum dos tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 - Resumo da análise de variância do teor foliar, acúmulo na parte aérea e acúmulo nas raízes de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K

F.V.		G.L.	Teor de nutrientes na folha 'D' (g kg ⁻¹)					
			N	P	K	Ca	Mg	S
Quadrado médio								
Bloco	3		0,18 ^{ns}	0,09 ^{ns}	35,53 ^{ns}	1,97 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,00 ^{ns}
N	3		5,92 [*]	0,45 ^{***}	55,18 [*]	6,46 [*]	0,06 ^{ns}	0,06 ^{***}
K	1		6,22 [*]	0,04 ^{ns}	162,00 ^{**}	0,12 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,01 ^{ns}
K: 240			6,57a	6,90a	18,16b	8,57a	4,02a	0,26a
K: 480			5,68b	6,82a	22,66a	8,44a	3,86a	0,29a
Quadrado médio								
N × K	3		1,31 ^{ns}	0,18 [*]	21,94 ^{ns}	1,60 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,01 [*]
Resíduo	21		1,32	0,05	11,39	1,57	0,19	0,003
C.V. (%)			18,82	3,38	16,54	14,75	11,31	19,79
Acúmulo de macronutrientes na parte aérea (mg por planta)								
			N	P	K	Ca	Mg	S
Quadrado médio								
Bloco	3		375,08 ^{ns}	44,70 ^{ns}	153,10 ^{ns}	278,92 ^{ns}	39,37 ^{ns}	2,25 ^{ns}
N	3		18.412,80 ^{***}	141,99 [*]	2.835,76 ^{***}	7.904,22 ^{**}	242,67 ^{***}	57,81 ^{ns}
K	1		1.521,58 ^{ns}	182,98 ^{**}	14.288,08 ^{***}	1,48 ^{ns}	83,65 ^{ns}	244,48 ^{**}
K: 240			427,58a	3.806,23b	886,59b	6.155,66a	3.731,13a	951,23b
K: 480			489,35a	4.242,35a	1.037,83a	10.381,78a	3.717,52a	1.053,49a
Quadrado médio								
N × K	3		171,67 ^{ns}	44,04 ^{ns}	1.162,97 ^{***}	937,42 ^{ns}	27,86 ^{ns}	118,39 [*]
Resíduo	21		523.626,57	38.733,10	1.447.094,95	875.922,14	47.222,29	29.436,52
C.V. (%)			17,98	20,45	14,55	25,13	21,68	22,63
Acúmulo de macronutrientes na raiz (mg por planta)								
			N	P	K	Ca	Mg	S
Quadrado médio								
Bloco	3		231,00 ^{ns}	7.313,00 ^{ns}	351,00 ^{ns}	112,00 ^{ns}	2.988,00 ^{ns}	30,00 ^{ns}
N	3		94,00 ^{ns}	6.608,00 ^{ns}	1.309,00 ^{***}	408,00 ^{**}	1.193,00 ^{ns}	4,00 ^{ns}
K	1		3.200,00 ^{***}	115.939,00 ^{***}	929,00 ^{**}	524,00 [*]	19.723,00 ^{**}	174,00 ^{**}
K: 240			59,30a	8,83a	40,09a	26,44a	4,31a	17,28a
K: 480			39,30b	5,02b	29,32b	18,34b	2,74b	12,63b
Quadrado médio								
N × K	3		74,00 ^{ns}	4.799,00 ^{ns}	48,00 ^{ns}	8,00 ^{ns}	860,00 ^{ns}	23,00 ^{ns}
Resíduo	21		2610,90	108,62	1645,90	1036,55	21,42	321,17
C.V. (%)			22,62	32,85	25,51	31,38	28,63	26,15

^{ns}, ***, **, *, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

Em relação ao acúmulo na parte aérea, houve interação significativa entre as doses de N e K₂O para o K e S. Na ausência de interação, observou-se que o Nitrogênio influenciou isoladamente o acúmulo de N, P, Ca e Mg. Por sua vez, o K₂O apresentou efeito significativo sobre o acúmulo de P (Tabela 4). Diferentemente da parte aérea, não houve interação entre as doses de N e K₂O para o acúmulo de nutrientes no sistema radicular, permitindo a análise independente dos fatores. O fornecimento de N promoveu alterações significativas apenas no acúmulo de K e Ca nas raízes. Já o fator K₂O, influenciou o acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S (Tabela 4).

4.2.1.1 Teor foliar de macronutrientes

O teor foliar de nitrogênio foi influenciado isoladamente pelos dois fatores de adubação, sem interação significativa entre eles. Em relação às doses de N, houve ajuste ao modelo linear (Figura 11a) com estimativa de que a cada kg ha⁻¹ de N aplicado, ocorre um incremento de 0,0031 g kg⁻¹ no teor foliar de nitrogênio. Quanto ao efeito do K₂O, observou-se um antagonismo. As plantas cultivadas com a maior dose de K₂O (480 kg ha⁻¹) apresentaram teor foliar de nitrogênio 13,4% menor àquelas submetidas à dose de 240 kg ha⁻¹ (Tabela 4).

O desdobramento da interação no teor foliar de P revelou comportamentos distintos conforme a adubação potássica. Na menor dose de K₂O, o fornecimento de nitrogênio não alterou significativamente o teor foliar de P, com as médias observadas mantendo-se estatisticamente constantes. Entretanto, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a variável ajustou-se ao modelo quadrático em função das doses de nitrogênio (Figura 11b). Observou-se uma redução inicial nos teores de P, atingindo um ponto de mínimo estimado, seguido de uma tendência de recuperação nas doses mais elevadas.

O teor foliar de K apresentou ajuste linear decrescente, o inverso do observado para o teor de N. Dessa forma, o aumento das doses de N reduziu a concentração de potássio nas folhas, com redução estimada de 0,009 g kg⁻¹ de K a cada kg ha⁻¹ de N aplicado (Figura 11c). Já o efeito da adubação potássica foi positivo. A dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionou um incremento de 24,8% no teor foliar de K em comparação à dose de 240 kg ha⁻¹ (Tabela 4), confirmando maior disponibilidade do nutriente.

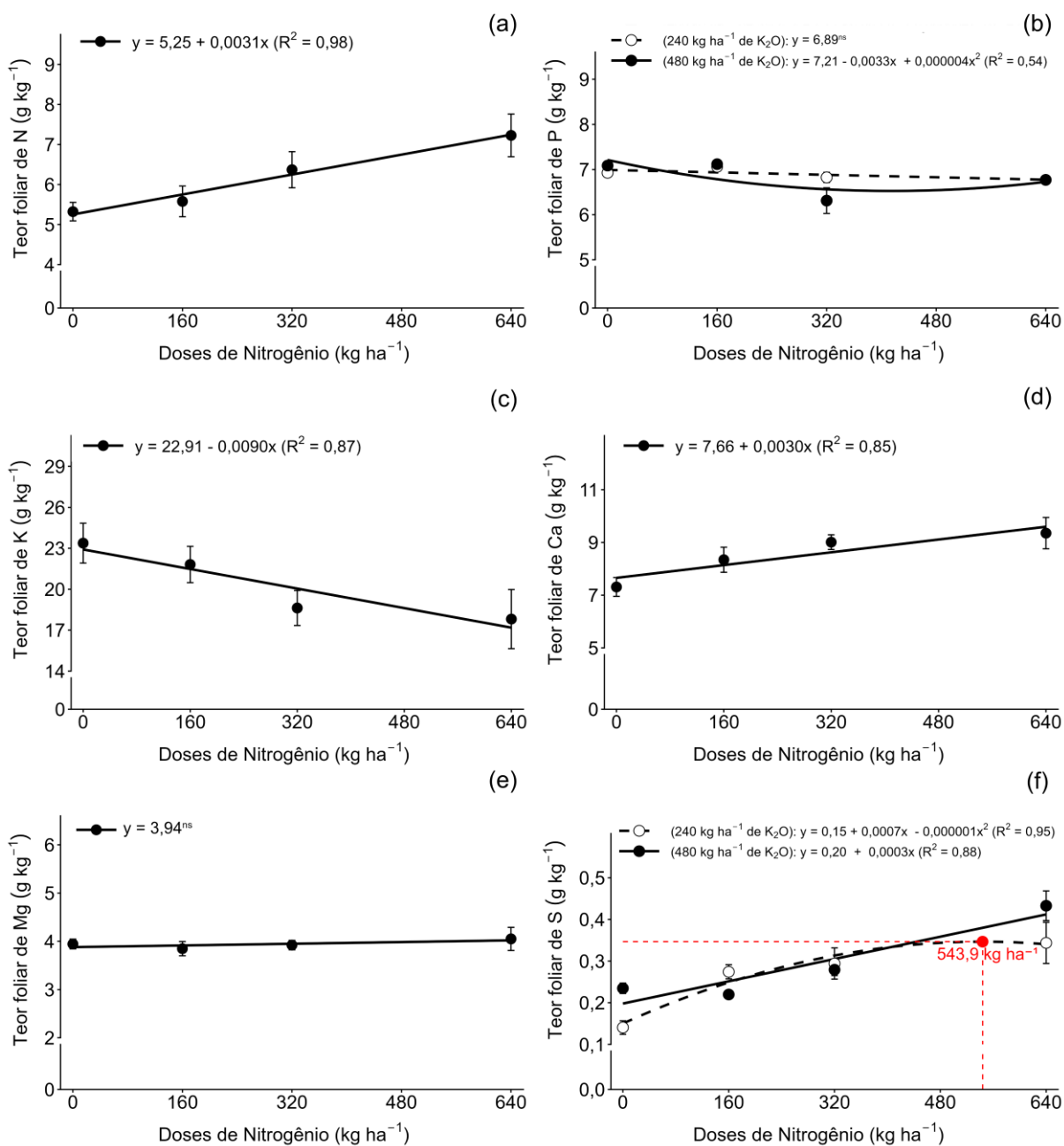


Figura 11 - Teor de nitrogênio (a); fósforo (b); potássio (c); cálcio (d); magnésio (e) e enxofre (f) na folha 'D' (diagnose) de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

O teor de Ca foi influenciado significativamente apenas pelas doses de N, ajustando-se ao modelo linear e apresentando uma estimativa de aumento de 0,0030 g kg⁻¹ de Ca que a cada kg ha⁻¹ de N aplicado (Figura 11d). As doses de potássio não interferiram nesta variável (Tabela 4). Para o magnésio, não houve efeito significativo de nenhum dos fatores estudados. Os teores

médios mantiveram-se estatisticamente inalterados independentemente das doses de N (Figura 11e) e K aplicadas (Tabela 4).

O desdobramento da interação para o enxofre mostrou respostas distintas à adubação nitrogenada dependendo da dose de potássio. Na presença de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, os dados ajustaram-se ao modelo quadrático, com ponto de máxima concentração de S foliar, estimado na dose de 543,9 kg ha⁻¹ de N, decrescendo a partir desta dose. Por outro lado, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a resposta ao nitrogênio foi linear, com estimativa de aumento de 0,0003 g kg⁻¹ de S por kg ha⁻¹ de N aplicado (Figura 11f).

4.2.1.2 Acúmulo de macronutrientes

O acúmulo de N apresentou comportamentos distintos entre os compartimentos da planta. Na parte aérea, observou-se resposta linear e positiva às doses de nitrogênio (Figura 12a). O modelo ajustado indica que a cada kg ha⁻¹ de N fornecido, a planta acumulou 5,44 mg de N na massa seca da parte aérea. O alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0,96$) confirma a forte dependência do acúmulo deste nutriente em relação à adubação nitrogenada. Por outro lado, a aplicação de K₂O não influenciou esta variável (Tabela 4). Já nas raízes, a adubação nitrogenada não influenciou o teor de N acumulado (Figura 12b). No entanto, a aplicação de K₂O na dose de 480 kg ha⁻¹ reduziu o acúmulo de N nas raízes em 33,7% em comparação à dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 4).

Para o acúmulo de P na parte aérea, os dados ajustaram-se ao modelo quadrático em função das doses de nitrogênio (Figura 12c). A equação demonstra um comportamento de queda inicial no acúmulo até a dose estimada de 270 kg ha⁻¹ de N, voltando a aumentar nas doses superiores. Quanto ao efeito do K₂O, o aumento da dose favoreceu o acúmulo do nutriente pela parte aérea, as plantas adubadas com 480 kg ha⁻¹ de K₂O acumularam, em média, 1037,83 mg de P na parte aérea, o que representa um incremento de 17,1% em relação à dose de 240 kg ha⁻¹ (Tabela 4).

Nas raízes, o padrão observado para o nitrogênio se repetiu, não houve efeito significativo das doses de N sobre o acúmulo de P (Figura 12d). Contudo, o acúmulo de P na raiz caiu de 8,82 mg por planta na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, para 5,02 mg por planta na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, representando uma redução de 43,1% (Tabela 4).

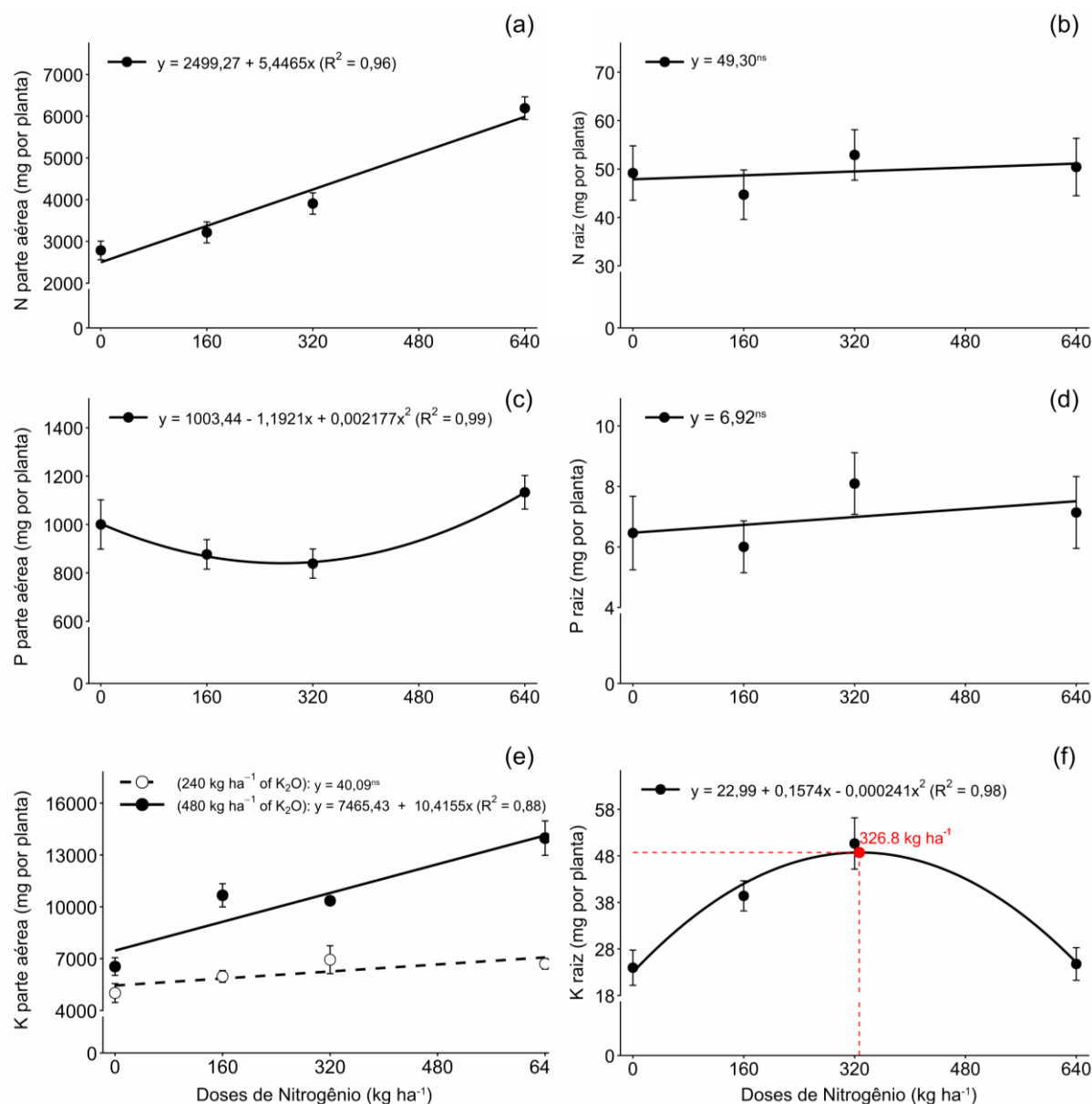


Figura 12 - Acúmulo de nitrogênio (a, b), fósforo (c, d) e potássio (e, f), na parte aérea e raiz de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

O acúmulo de K na parte aérea apresentou interação significativa. O desdobramento revelou que, na menor dose de K₂O, o fornecimento de nitrogênio não alterou a quantidade de K acumulada. Entretanto, quando a disponibilidade de K₂O foi alta, o acúmulo de K respondeu linearmente ao nitrogênio (Figura 12e). Nesta condição, para cada kg ha⁻¹ de N aplicada, houve um incremento de 10,41 mg por planta no acúmulo de K.

Nas raízes, não houve interação, mas ambos os efeitos simples foram significativos. o acúmulo radicular de K ajustou-se ao modelo quadrático em função das doses de N (Figura 12f), com ponto de máximo acúmulo estimado na dose de 326,8 kg ha⁻¹ de N. Quanto ao efeito

das doses de K_2O , observou-se que as plantas sob dose de 480 kg ha^{-1} de K_2O acumularam 26,8% menos potássio nas raízes do que aquelas sob 240 kg ha^{-1} de K_2O (Tabela 4).

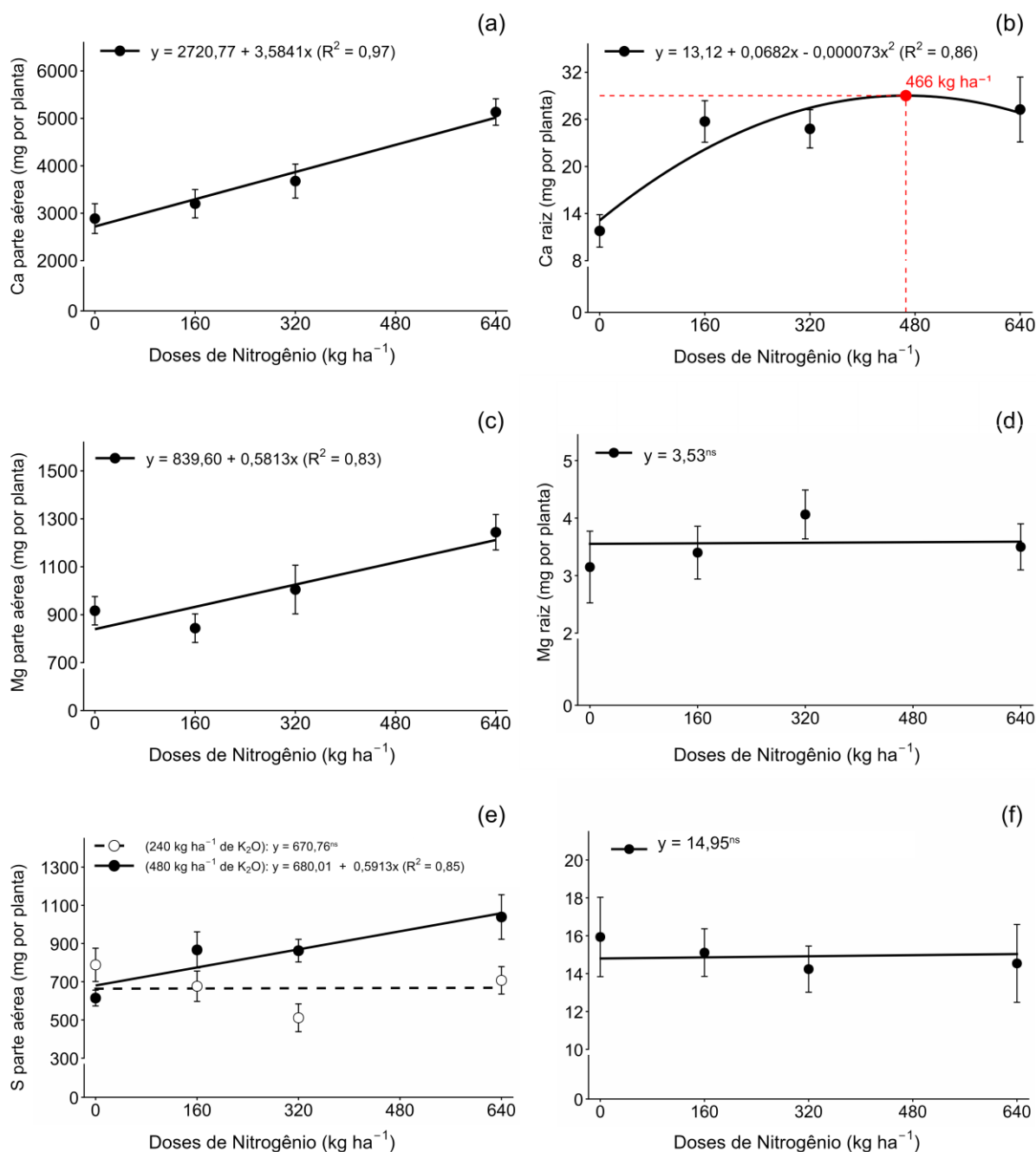


Figura 13 - Acúmulo de cálcio (a, b); magnésio (c, d) e enxofre (e, f) na parte aérea e raiz de plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

O acúmulo de Ca na parte aérea teve efeito significativo em função das doses de N, ajustando-se ao modelo linear, com incremento estimado de 3,58 mg por planta de Ca para cada kg ha^{-1} de N aplicado (Figura 13a). No sistema radicular, observou-se resposta quadrática à

aplicação de N (Figura 13b), com ponto de máximo acúmulo estimado na dose de 466 kg ha⁻¹ de N. Por sua vez, a aplicação da maior dose de K₂O promoveu redução de 30,6% no acúmulo de Ca, em comparação à dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 4).

Para o Mg na parte aérea, houve ajuste linear em função das doses de nitrogênio (Figura 13c). A cada kg ha⁻¹ de N aplicado, estimou-se o acúmulo de 0,58 mg por planta de Mg na parte aérea. As doses de K₂O não tiveram influência sobre essa variável (Tabela 4). No sistema radicular, as doses de N não promoveram alterações significativas no acúmulo de Mg (Figura 13d). Por outro lado, a aplicação da dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O reduziu o acúmulo de Mg, no sistema radicular, em 36,4%, em relação à menor dose (Tabela 4).

O acúmulo de S na parte aérea apresentou interação significativa. O desdobramento demonstrou que, na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, as doses de N não alteraram a quantidade de S acumulada. Contudo, na presença da dose 480 kg ha⁻¹ de K₂O, houve resposta linear crescente às doses de N, com ganho de 0,59 mg por planta de S acumulado por kg ha⁻¹ de N aplicado (Figura 13e). Nas raízes, não houve influência das doses de N no acúmulo de S (Figura 13f). No entanto, a aplicação de K₂O promoveu alterações no acúmulo deste nutriente no sistema radicular. Com a aplicação da dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O o acúmulo de S do sistema radicular diminuiu 26,9% quando comparado com a dose de 240 kg ha⁻¹ (Tabela 4).

4.2.2 Eficiência nutricional

Para a eficiência de absorção, não houve interação significativa entre as doses de nitrogênio e potássio para nenhum dos macronutrientes avaliados, indicando atuação independente dos fatores. O fator N influenciou significativamente a eficiência de absorção de N, K, Ca, Mg e S. Já o fator K exerceu influência significativa sobre a eficiência de absorção de todos os macronutrientes analisados. De forma semelhante, a eficiência de translocação não apresentou interação significativa entre os fatores. As doses de N alteraram significativamente a translocação de N, P, K e Ca. Por sua vez, o fornecimento de K₂O influenciou a eficiência de translocação de N, P, K e Mg. Para o S, a eficiência de translocação não foi afetada por nenhum dos tratamentos (Tabela 5).

Na eficiência de uso dos nutrientes, foi observado interação significativa entre as doses de N e K₂O para a eficiência de uso de K e Ca, indicando dependência entre os fatores para estas variáveis. Para os demais elementos, analisaram-se os efeitos simples. A aplicação de N influenciou a eficiência de uso de P, Mg e S. Já a aplicação de K₂O, promoveu alterações significativas na eficiência de uso de N (Tabela 5).

Tabela 5 - Resumo da análise de variância da eficiência de absorção, translocação e uso de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) em plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K

F.V.	G.L.	Eficiência de absorção (mg kg ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Quadrado médio							
Bloco	3	45.383,00 ^{ns}	1.830,00 ^{ns}	142.933,00 ^{ns}	31.742,00 ^{ns}	1.881,00 ^{ns}	4.597,00 ^{ns}
N	3	482.000,00 ^{***}	3.428,00 ^{ns}	725.614,00 ^{**}	239.723,00 ^{***}	5.378,00 [*]	4.388,00 ^{**}
K	1	620.384,00 ^{**}	35.761,00 ^{***}	7.886.940,00 ^{***}	260.594,00 [*]	30.772,00 ^{***}	48.325,00 ^{***}
K: 240		584,04b	123,32b	810,09b	497,18 _b	120,88 _b	116,66 _b
K: 480		862,52a	190,18a	1803,00a	677,66 _a	182,90 _a	194,38 _a
Quadrado médio							
N × K	3	10,53 ^{ns}	3.327,00 ^{ns}	199.160,00 ^{ns}	6.027,00 ^{ns}	248,00 ^{ns}	386,00 ^{ns}
Resíduo	21	36.217,00	1.412,81	104.389,67	27.542,00	1.680,05	835,86
C.V. (%)		26,31	23,98	24,73	28,25	26,99	18,59
Eficiência de translocação (%)							
		N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	3	10,22 ^{ns}	15,87 ^{ns}	5,65 ^{ns}	7,69 ^{ns}	8,69 ^{ns}	75,27 ^{ns}
N	3	92,99 ^{***}	55,94 ^{***}	44,83 ^{***}	62,55 ^{***}	7,38 ^{ns}	231,80 ^{ns}
K	1	58,88 ^{**}	204,84 ^{***}	176,01 ^{***}	17,77 ^{ns}	62,85 ^{***}	149,30 ^{ns}
K: 240		72,63b	79,72b	84,74b	83,29 _a	86,98 _b	60,66 _b
K: 480		75,35a	84,78a	89,43a	84,78 _a	89,78 _a	66,69 _a
Quadrado médio							
N × K	3	3,17 ^{ns}	13,51 ^{ns}	0,76 ^{ns}	3,88 ^{ns}	0,81 ^{ns}	135,70 ^{ns}
Resíduo	21	148,93	150,21	41,63	99,00	102,17	2928,10
C.V. (%)		3,6	3,25	1,62	2,58	2,5	18,1
Eficiência de uso (g ² mg ⁻¹)							
		N	P	K	Ca	Mg	S
Bloco	3	1,05 ^{ns}	34,66 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,69 ^{ns}	12,29 ^{ns}	67,46 ^{ns}
N	3	0,96 ^{ns}	268,64 ^{**}	7,45 ^{***}	4,20 ^{ns}	144,06 [*]	283,51 ^{***}
K	1	10,53 ^{***}	87,20 ^{ns}	9,39 ^{**}	34,37 ^{***}	108,17 ^{ns}	3,79 ^{ns}
K: 240		6,34b	30,26a	4,72a	7,58 _b	31,07 _a	33,01 _a
K: 480		7,48a	33,56a	3,63b	9,65 _a	34,75 _a	33,70 _a
Quadrado médio							
N × K	3	0,83 ^{ns}	57,57 ^{ns}	6,85 ^{**}	12,06 ^{**}	48,86 ^{ns}	73,93 ^{ns}
Resíduo	21	0,49	37,89	0,89	2,24	43,74	34,46
C.V. (%)		10,22	19,29	22,55	17,36	20,1	17,6

^{ns}, ^{***}, ^{**}, ^{*}, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

4.2.2.1 Eficiência de absorção de macronutrientes

A eficiência de absorção (EA) dos macronutrientes foi influenciada de maneira significativa e independente pelos fatores N e K₂O. O fornecimento de N promoveu aumento linear na eficiência de absorção de N, K, Ca, Mg e S (Figura 14). Ao comparar os coeficientes angulares das equações de regressão, verifica-se que o fornecimento de N estimulou a eficiência de absorção com intensidades distintas entre os macronutrientes.

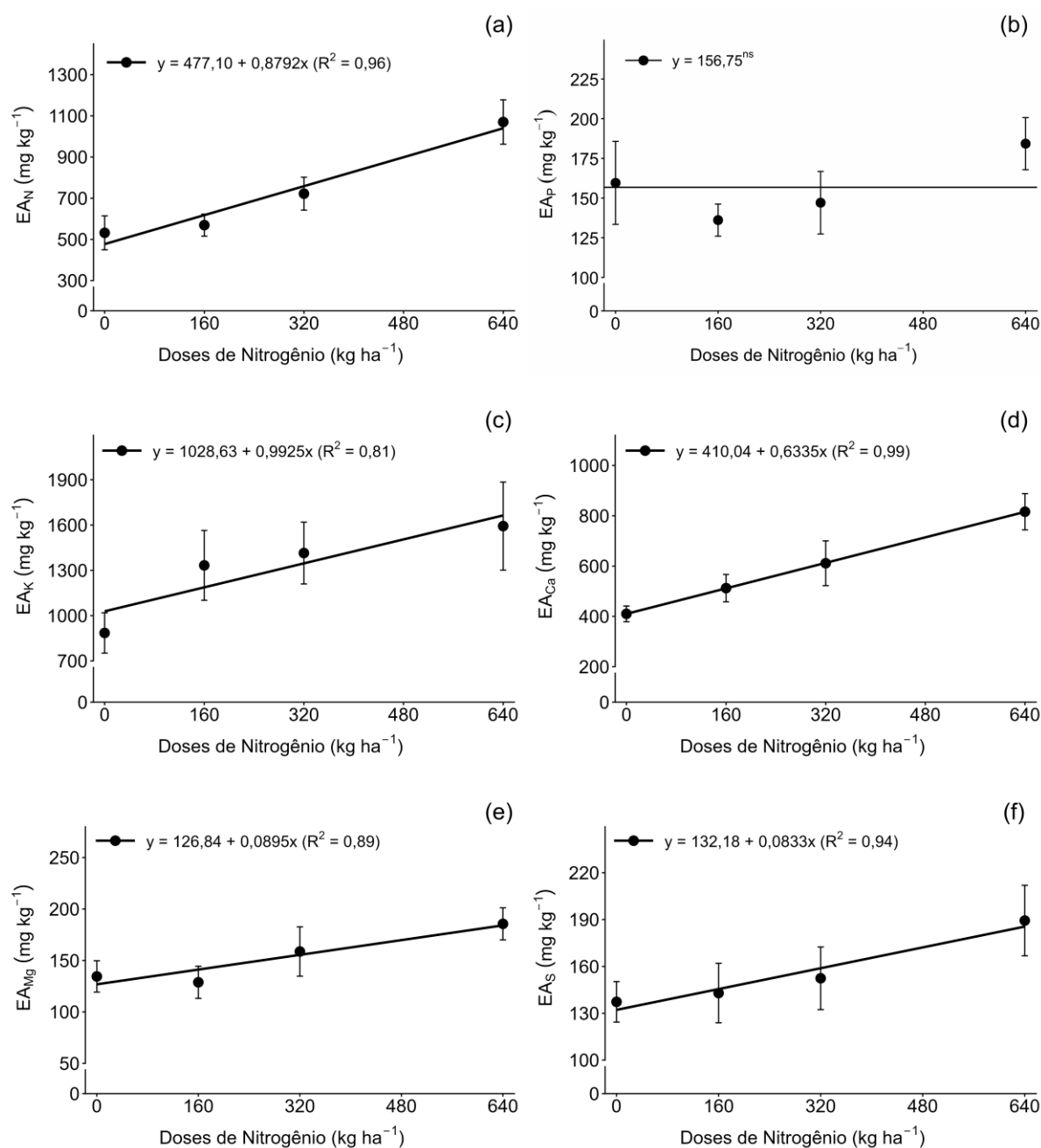


Figura 14 - Eficiência de absorção de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (g) de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura com diferentes doses de nitrogênio. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

Para cada kg ha^{-1} de N aplicado, houve incremento de $0,99 \text{ mg kg}^{-1}$ na EA_K (Figura 14c), seguido por $0,88 \text{ mg kg}^{-1}$ na EA_N (Figura 14a), $0,63 \text{ mg kg}^{-1}$ na EA_{Ca} (Figura 14d), $0,09 \text{ mg kg}^{-1}$ na EA_{Mg} (Figura 14e) e $0,08 \text{ mg kg}^{-1}$ na EA_S (Figura 14f). Dessa forma, estabeleceu-se a seguinte ordem de resposta da eficiência de absorção à adubação nitrogenada: $K > N > Ca > Mg > S > P$.

A aplicação de K_2O foi determinante para a eficiência de absorção dos macronutrientes avaliados. Os ganhos proporcionados pela maior dose de potássio foram expressivos. Observou-se incremento de 47,7% na EA_N , 54,2% na EA_P , 122,5% na EA_K , 36,3% na EA_{Ca} , 51,3% na EA_{Mg} e 66,6% na EA_S (Tabela 5). Em ordem decrescente, a eficiência de absorção desses nutrientes respondeu à aplicação de K_2O na seguinte ordem: $K > S > P > Mg > N > Ca$.

4.2.2.2 Eficiência de translocação de macronutrientes

A eficiência de translocação de N (ET_N) respondeu linearmente às doses de N (Figura 15a), com incremento estimado de 0,011% para cada kg ha^{-1} de N aplicado. A ET_N média variou de 70% a 78%, considerando as doses de N aplicadas. O potássio também influenciou esse processo, plantas que receberam aplicação de 480 kg ha^{-1} de K_2O apresentaram ET_N de 75,3%, estatisticamente superior aos 72,6% observados na dose de 240 kg ha^{-1} de K_2O (Tabela 5).

Para o P, K e Ca, a resposta às doses de N ajustou-se ao modelo quadrático, com redução inicial na ET, seguida de recuperação nas doses mais elevadas de N (Figura 15b, Figura 15c e Figura 15d). Os pontos de menor ET foram estimados nas doses de 342, 290 e 406 kg ha^{-1} de N para P, K e Ca, respectivamente. Ressalta-se, contudo, que mesmo apresentando um ponto de mínima, a ET para esses nutrientes ainda continuou acima de 80%.

Quanto ao efeito do K_2O , a dose de 480 kg ha^{-1} promoveu maior ET_P (84,8%) e ET_K (89,4%) em comparação à dose de 240 kg ha^{-1} de K_2O . Para o Ca, entretanto, as doses de K_2O não alteraram significativamente a ET, apresentando média geral de 84% (Tabela 5). A ET_{Mg} não foi influenciada pelas doses de nitrogênio (Figura 15e), mantendo média de 88,4%. Porém, o aumento da dose de potássio elevou significativamente a ET_{Mg} , passando de 87,0% para 89,8% (Tabela 5).

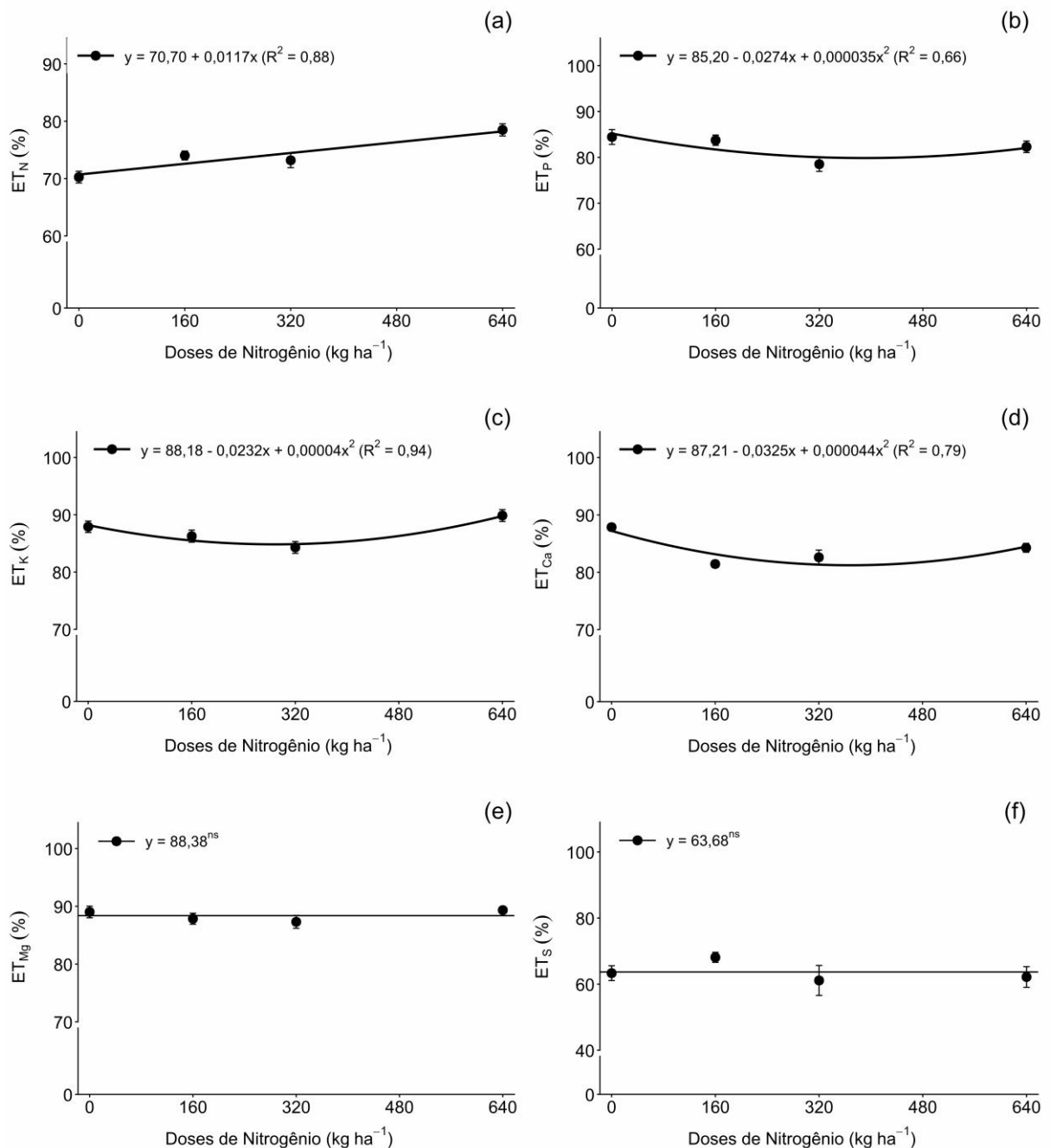


Figura 15 - Eficiência de translocação de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (g) de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

4.2.2.3 Eficiência de uso de macronutrientes

A eficiência de uso (EU) expressa a capacidade da planta em converter o nutriente absorvido em biomassa. Os resultados indicaram comportamentos distintos entre os macronutrientes, com interações significativas observadas para o K (Figura 16c) e Ca (Figura 16d). Para a eficiência de uso de nitrogênio (EU_N) não houve efeito significativo das doses de

N aplicadas (Figura 16a), apresentando média de $6,91 \text{ g}^2 \text{ mg}^{-1}$. No entanto, a aplicação de K_2O influenciou significativamente esta variável. A dose de 480 kg ha^{-1} de K_2O proporcionou um incremento de 18% na EU_N em comparação à dose de 240 kg ha^{-1} de K_2O (Tabela 5).

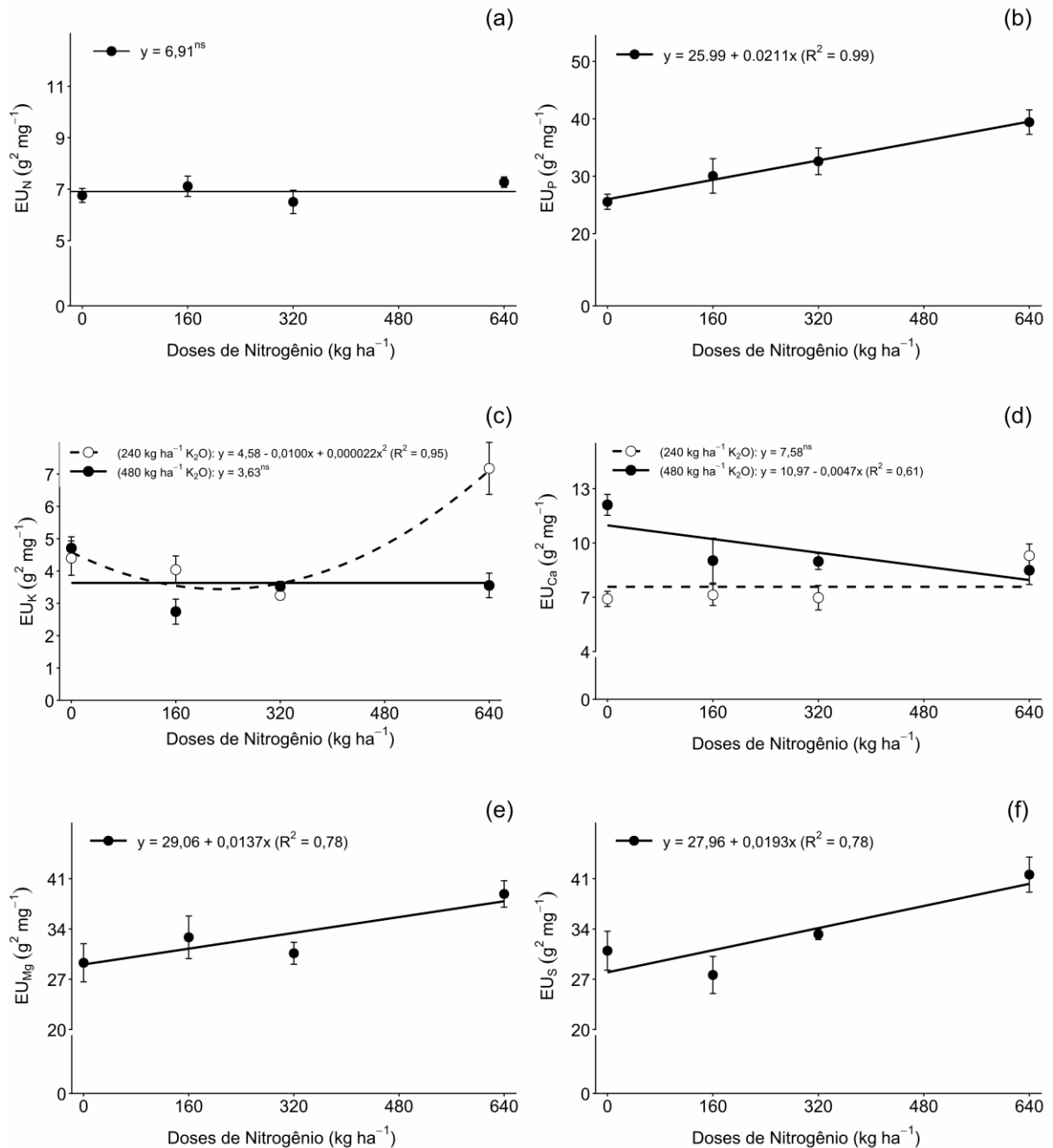


Figura 16 – Eficiência de uso de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d), magnésio (e) e enxofre (g) de plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

A eficiência de uso de P (EU_P) apresentou resposta linear às doses de nitrogênio (Figura 16b). O incremento estimado foi de $0,021 \text{ g}^2 \text{ mg}^{-1}$ para cada kg ha^{-1} de N aplicado. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$) demonstra alta correlação positiva entre o fornecimento de N e a

EU_P. As doses de K₂O não influenciaram a EU_P. Para a eficiência de uso de K (EU_K), houve interação significativa. O desdobramento revelou que, na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, a EU_K respondeu à aplicação de N segundo um modelo quadrático. Entretanto, a aplicação de N, associada à dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, não influenciou a EU_K (Figura 16c).

A eficiência de uso de Ca (EU_{Ca}) apresentou interação entre os fatores N e K₂O. Na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, não houve efeito significativo do nitrogênio. Porém, quando a dose de K₂O foi elevada para 480 kg ha⁻¹, a EU_{Ca} decresceu linearmente com o aumento das doses de N (Figura 16d).

A eficiência de uso do Mg e S, respondeu de forma linear e crescente às doses de N (Figura 16e, Figura 16f) com incrementos estimados de 0,013 e 0,019 g² mg⁻¹ por kg ha⁻¹ de N aplicado, respectivamente. As doses de K₂O não influenciaram significativamente a EU destes dois nutrientes (Tabela 5).

4.3 Parâmetros fisiológicos

Observou-se interação significativa entre as doses de N e K₂O apenas para o teor de clorofila *b* ($p < 0,05$), indicando que a resposta deste pigmento à adubação nitrogenada depende do nível de potássio fornecido. As respostas da clorofila *a*, clorofila total e carotenoides, não apresentaram interação significativa nem efeito da aplicação de K₂O (Tabela 6).

Tabela 6 - Análise de variância do teor de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenoides em plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K

F.V.	G.L.	Pigmentos fotossintéticos (µg g ⁻¹ MS)			
		Clorofila <i>a</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofila total	Carotenoides
Quadrado médio					
Bloco	3	13.246,33 ^{ns}	2.254,00 ^{ns}	24.771,33 ^{ns}	4.618,00 ^{ns}
N	3	241.894,67 ^{***}	87.356,33 ^{***}	598.575,33 ^{***}	105.882,67 ^{**}
K	1	57,00 ^{ns}	29,00 ^{ns}	5,00 ^{ns}	1.537,00 ^{ns}
K: 240		1.124,79 _a	268,14 _a	1.392,93 _a	546,08 _a
K: 480		1.122,11 _a	270,03 _a	1.392,14 _a	559,94 _a
Quadrado médio					
N × K	3	6.531,33 ^{ns}	8.533,00 [*]	24.999,33 ^{ns}	21.798,67 ^{ns}
Resíduo	21	10.581,00	2.008,43	14.974,76	15.378,43
C.V. (%)		9,16	16,65	8,79	22,42

^{ns}, ^{***}, ^{**}, ^{*}, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

O teor de clorofila *a* apresentou incremento máximo na dose estimada de 347,8 kg ha⁻¹ de N, pela equação da reta (Figura 17a). Comportamento similar foi verificado para a clorofila total, onde o ponto de máximo acúmulo do pigmento foi estimado na dose de 331,6 kg ha⁻¹ de N (Figura 17c). O coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,72 em ambos os casos indica um bom ajuste do modelo aos dados.

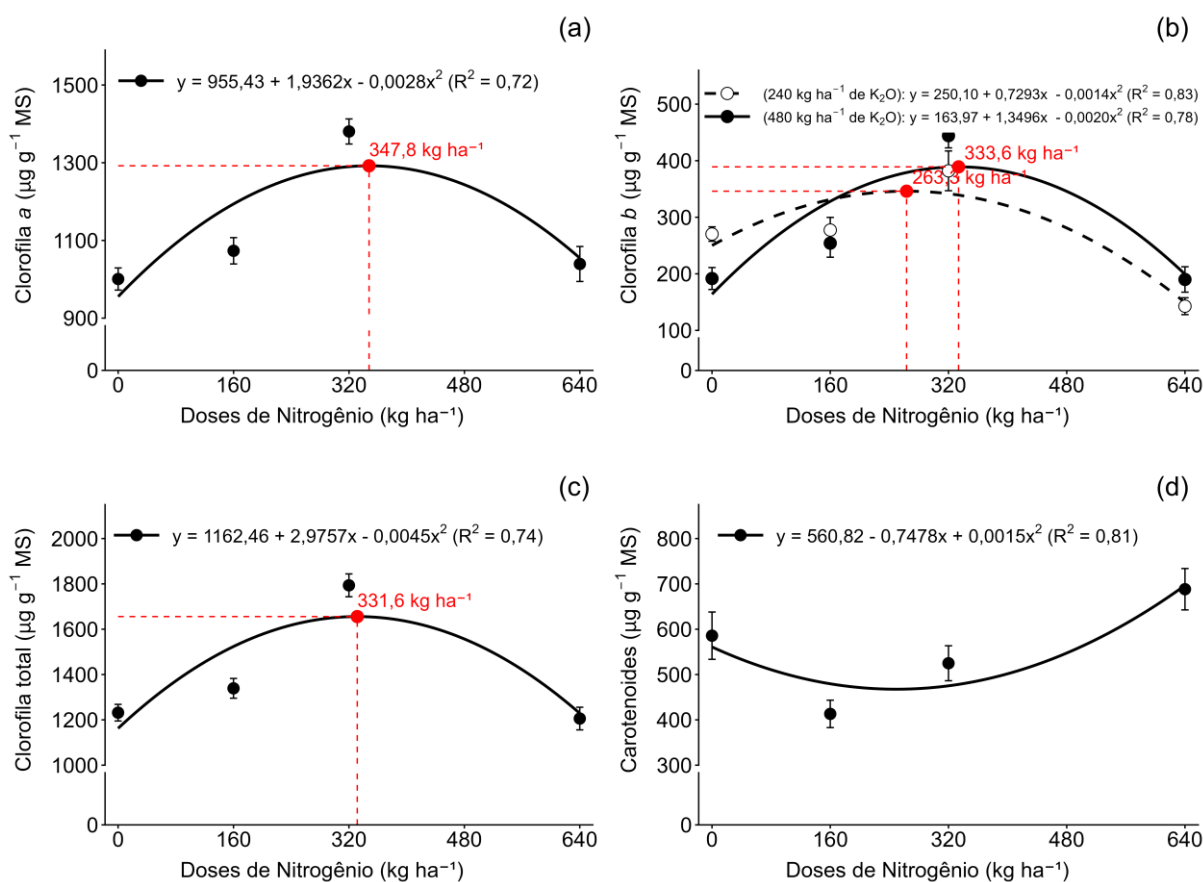


Figura 17 - Teor de clorofila *a* (a), clorofila *b* (b), clorofila total (c) e carotenoides (d) em plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

Para a clorofila *b*, o desdobramento da interação revelou que a resposta ao N segue o modelo quadrático em ambos os níveis de K₂O, porém com pontos de máxima eficiência distintos (Figura 17b). Na presença de 240 kg ha⁻¹ de N de K₂O, o teor máximo de clorofila *b* foi alcançado com a dose estimada de 263 kg ha⁻¹ de N. Quando a dose de K₂O foi elevada para 480 kg ha⁻¹, o pico de concentração do pigmento deslocou-se para uma dose superior de nitrogênio, estimada em 337 kg ha⁻¹.

O teor de carotenoides apresentou comportamento inverso ao observado para as clorofilas. A variável ajustou-se ao modelo quadrático com concavidade voltada para cima

(Figura 17d), indicando um ponto mínimo. A equação da curva estima que o menor teor de carotenoides foi na dose de 249 kg ha⁻¹ de N.

4.4 Parâmetros bioquímicos

Nas folhas, a atividade da SOD apresentou efeito significativo apenas para as doses de N ($p < 0,001$). Para a atividade das enzimas CAT, APX e G-POD, observou-se interação significativa entre as doses de N e K₂O (Tabela 7). No sistema radicular, todas as enzimas avaliadas apresentaram interação significativa entre os fatores N e K₂O (Tabela 7).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância da atividade da enzima Superóxido dismutase (SOD), Catalase (CAT), Ascorbato peroxidase (APX) e Guaiacol peroxidase (G-POD) em folhas e raízes de plantas de abacaxizeiro ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K

		Enzimas do sistema antioxidante na folha			
F.V.	G.L.	SOD	CAT	APX	G-POD
		(U mg ⁻¹ Prot.)	(μmol H ₂ O ₂ min ⁻¹ mg ⁻¹ Prot.)		
Quadrado médio					
Bloco	3	0,27 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1.212,33 ^{ns}	28,00 ^{ns}
N	3	49.532,67 ^{***}	5.122,33 ^{***}	4.697,00 [*]	5.433,67 ^{***}
K	1	0,02 ^{ns}	15.611,00 ^{***}	180.221,00 ^{***}	10.640,00 ^{***}
K: 240		1,34a	1,31a	57,46 _b	27,52 _b
K: 480		1,28a	0,87b	206,62 _a	63,98 _a
Quadrado médio					
N × K	3	4.888,33 ^{ns}	0,28 ^{**}	4.976,67 [*]	6.902,33 ^{***}
Resíduo	21	0,21	0,05	1428,57	148,86
C.V. (%)		35,15	19,83	28,73	26,8
		Enzimas do sistema antioxidante na raiz			
		SOD	CAT	APX	G-POD
Quadrado médio					
Bloco	3	0,12 ^{ns}	0,002 ^{ns}	129,63 ^{ns}	107,00 ^{ns}
N	3	21.973,33 ^{***}	0,21 ^{***}	5.222,93 ^{***}	2.167,60 ^{***}
K	1	16.933,00 ^{**}	0,02 ^{ns}	49,80 ^{ns}	8.323,10 ^{***}
K: 240		5,50b	0,45a	63,57 _a	26,25 _b
K: 480		6,95a	0,51a	61,07 _a	58,51 _a
Quadrado médio					
N × K	3	16.092,33 ^{***}	0,06 [*]	851,97 [*]	2.025,50 ^{***}
Resíduo	21	1,33	0,02	4.043,2	1.065,7
C.V. (%)		18,5	30,13	22,26	16,81

^{ns}, ^{***}, ^{**}, ^{*}, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

A atividade da enzima SOD nas folhas foi influenciada pelas doses de N, ajustando-se ao modelo quadrático (Figura 18a). Observou-se redução na atividade enzimática com o aumento das doses de N até o ponto de mínimo estimado em 185 kg ha⁻¹, voltando a aumentar nas doses superiores. Nas raízes, houve interação significativa na atividade da enzima SOD (Figura 18b). Na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, a atividade da SOD não foi alterada pelas doses de nitrogênio ($p > 0,05$).

Na presença da dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a resposta ao N foi quadrática, com ponto de mínima atividade estimado na dose de 360 kg ha⁻¹ de N. Nota-se que, nas raízes sob alta dose de K₂O, a atividade da SOD foi expressivamente maior nas menores e maiores doses de N, indicando uma forte ativação do sistema de defesa antioxidante no sistema radicular, nestas condições.

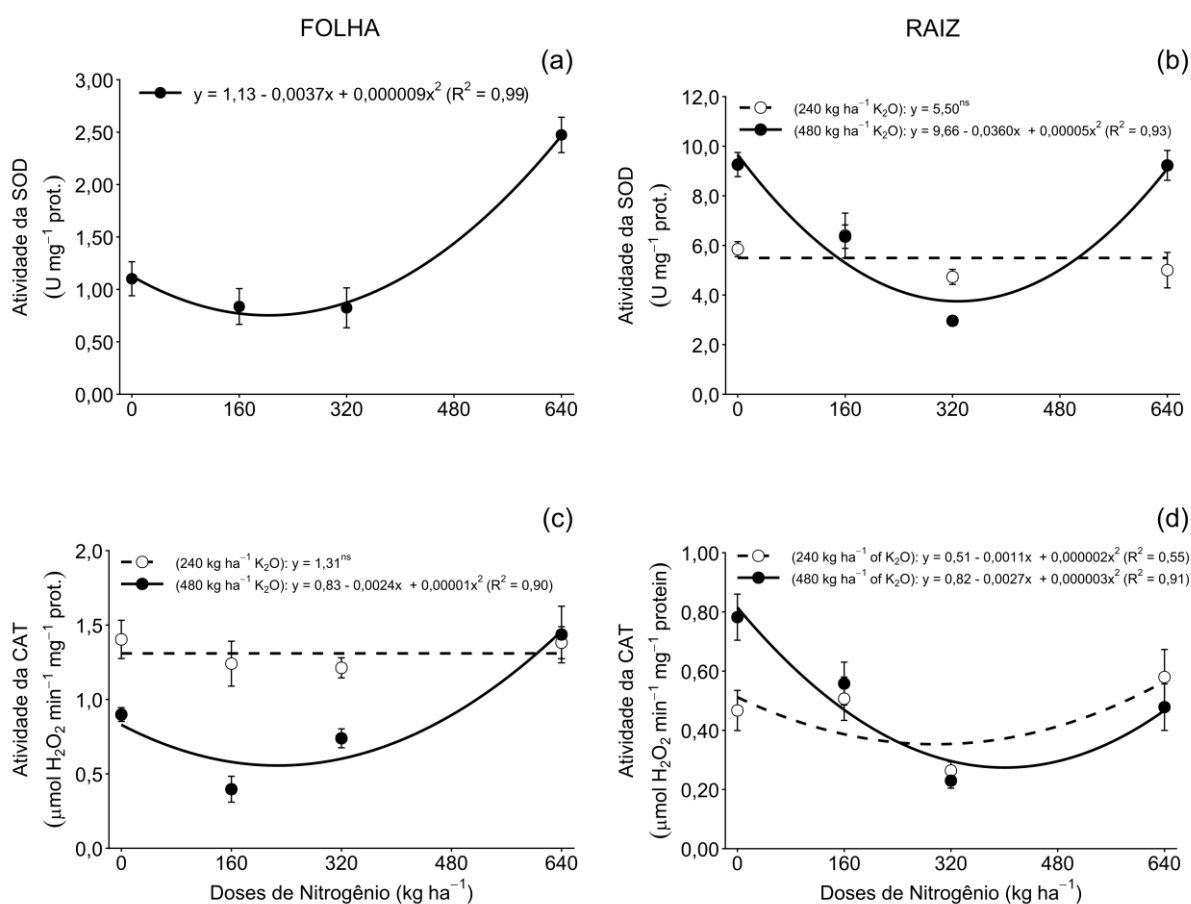


Figura 18 - Atividade da enzima Superóxido Dismutase (a, b) e Catalase (c, d) em folhas e raízes de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

A atividade da catalase apresentou interação significativa em ambos os compartimentos da planta. Nas folhas, sob a dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, não houve variação significativa em função das doses de N ($p > 0,05$) (Figura 18c). No entanto, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a

atividade da CAT apresentou comportamento quadrático, com redução inicial e aumento em níveis mais elevados da dose de N, indicando maior ativação do sistema antioxidante sob condições de deficiência ou excesso deste nutriente.

No sistema radicular, o padrão de resposta foi quadrático para ambos os níveis de potássio (Figura 18d). As altas doses de N associadas as duas doses de K₂O avaliadas, elevou a atividade da CAT nas condições de deficiência ou excesso de N, sinalizando uma resposta coordenada do sistema antioxidante frente ao estresse nutricional desse elemento essencial.

A atividade da APX apresentou comportamento distinto entre os órgãos da planta e doses de potássio. Nas folhas, não houve efeito significativo das doses de nitrogênio quando combinadas com a dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O ($p > 0,05$). Entretanto, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, os dados ajustaram-se ao modelo quadrático, apresentando ponto de mínima atividade enzimática estimada, na dose de 312 kg ha⁻¹ de N. Observa-se que, nas doses extremas de N, a atividade da APX foi substancialmente elevada, indicando resposta ao estresse (Figura 19a).

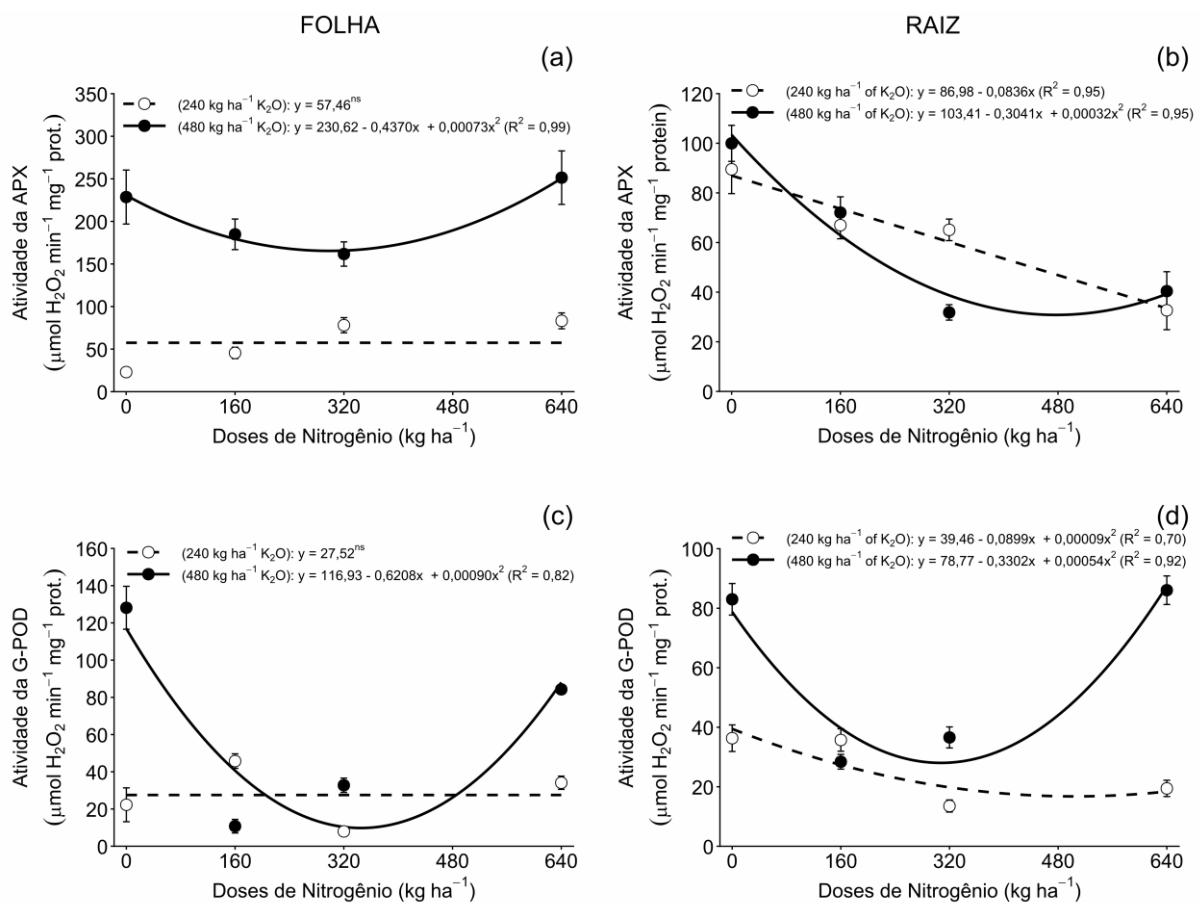


Figura 19 - Atividade da enzima Ascorbato peroxidase (a, b) e Guaiacol peroxidase (c, d) em folhas e raízes de plantas de abacaxizeiro 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. Fonte: o autor.

No sistema radicular, a interação entre as doses de N e K₂O foi significativa. Sob a dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, houve redução linear na atividade da APX com o aumento do fornecimento de nitrogênio, sugerindo que o aporte de N mitigou o estresse oxidativo nesta condição. Já na presença de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a resposta foi quadrática, com redução da atividade até a dose estimada de 507 kg ha⁻¹ de N, enquanto doses inferiores ou superiores de N, promoveram maior resposta da atividade da APX (Figura 19b), possivelmente associada a condições de estresse por deficiência ou excesso deste nutriente.

Para a enzima G-POD nas folhas, o desdobramento da interação indicou ausência de efeito significativo das doses de nitrogênio dentro do nível de 240 kg ha⁻¹ de K₂O ($p > 0,05$). Por outro lado, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a atividade enzimática seguiu o modelo quadrático, atingindo valor mínimo estimado na dose de 346 kg ha⁻¹ de N. Da mesma forma que as atividades enzimáticas anteriores, doses de 0 e 640 kg ha⁻¹ de N, promoveram respostas superiores para a atividade da G-POD nas folhas do abacaxizeiro ‘Pérola’ (Figura 19c).

Por outro lado, no sistema radicular, ambas as doses de K₂O resultaram em ajuste quadrático para a atividade da G-POD. Para a dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, houve mínima atividade estimada, pela equação da curva, em 450 kg ha⁻¹ de N. Já na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, a curva foi mais acentuada e o ponto de mínima estimado ocorre com 330 kg ha⁻¹ de N. Assim como a atividade das demais enzimas avaliadas, doses baixas e altas de N, promoveram maiores respostas para a atividade da G-POD no sistema radicular do abacaxizeiro ‘pérola’ (Figura 19d).

4.5 Parâmetros de produção

A aplicação de N influenciou significativamente a massa do fruto com coroa, massa do fruto sem coroa, rendimento de polpa e produtividade. A aplicação de K₂O teve efeito sobre a massa do fruto com coroa e produtividade, não alterando estatisticamente a massa do fruto sem coroa e o rendimento de polpa (Tabela 8).

A massa do fruto com coroa apresentou resposta quadrática em função da aplicação de N, com aumento da massa do fruto até um ponto máximo e posterior redução em doses mais elevadas de N (Figura 20a). O valor máximo de MFCC estimado pela regressão ocorreu com aplicação de 448 kg ha⁻¹ de N. Nessa dose a estimativa é que a massa do fruto com coroa apresente uma média de 921,6 g, com intervalo de confiança de 95%, variando de 862,7g a 980,4g. A aplicação de K₂O também apresentou efeito significativo sobre a MFCC. A aplicação de 480 kg ha⁻¹ de K₂O promoveu aumento da massa do fruto em relação à dose de 240 kg ha⁻¹

de K_2O , elevando a média da MFCC de 695,8 g para 770 g (Tabela 8), o que representa um incremento de aproximadamente 10,7%.

Tabela 8 - Resumo da análise de variância da massa do fruto com coroa (MFCC), massa do fruto sem coroa (MFSC), rendimento de polpa (RP) e produtividade de abacaxizeiro ‘pérula’ em resposta a adubação de cobertura de N e K_2O

Produção, rendimento e produtividade					
F.V.	G.L.	MFCC (g)	MFSC (g)	RP (%)	Produtividade (t ha ⁻¹)
Quadrado médio					
Bloco	3	27.422,67 ^{ns}	15.196,67 ^{ns}	51,88 ^{ns}	40,57 ^{ns}
N	3	282.464,00***	170.726,67***	100,00*	417,83***
K	1	44.030,00**	6.133,00 ^{ns}	2,18 ^{ns}	65,13**
K: 240		695,81b	443,94a	67,95 _a	26,76 _b
K: 480		770,00a	471,63a	68,47 _a	29,61 _a
Quadrado médio					
N × K	3	6.003,00 ^{ns}	18.613,33 ^{ns}	21,54 ^{ns}	8,88 ^{ns}
Resíduo	21	6.560,19	6.971,62	21,66	9,70
C.V. (%)		11,05	18,24	6,82	11,05

^{ns}, ^{***}, ^{**}, ^{*}, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

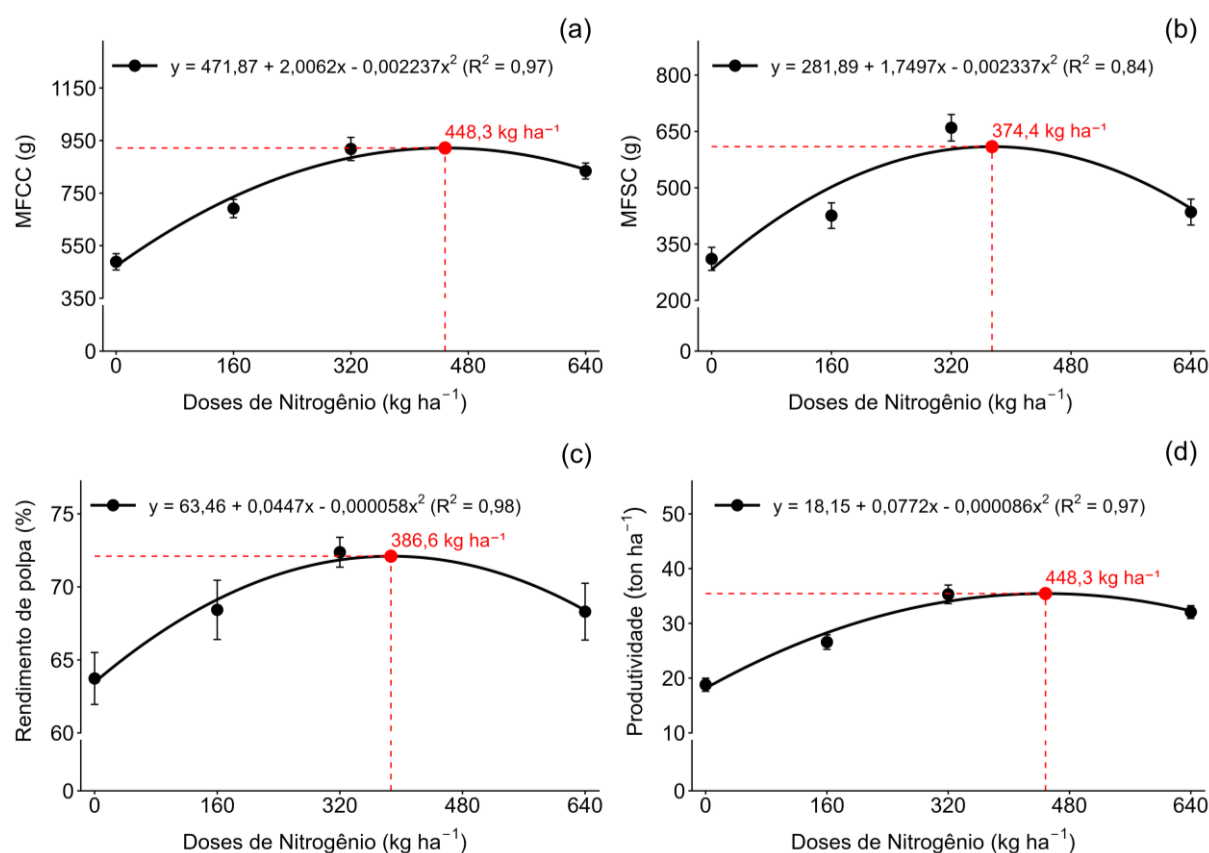


Figura 20 – Massa do fruto com coroa (a), massa do fruto sem coroa (b), rendimento de polpa (c) e produtividade (d) de abacaxi ‘Pérula’ em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

Para a massa do fruto sem coroa, não foi observada interação entre N e K₂O. A aplicação de N apresentou efeito significativo, com resposta quadrática, indicando aumento da massa do fruto sem coroa até um valor máximo, seguido de redução em doses mais altas (Figura 20b). A equação de regressão da curva estima que o ponto de máxima MFSC ocorreu com aplicação de 347,42 kg ha⁻¹ de N. Nessa dose a estimativa é que a massa do fruto sem coroa apresente uma média de 609,4 g, com intervalo de confiança de 95%, variando de 545,4g a 673,5g. Por outro lado, as doses de K₂O aplicadas não influenciaram significativamente a MFSC, apresentando valor médio de 457,7g.

O rendimento de polpa foi influenciado significativamente pelo N, apresentando resposta quadrática, sem interação com o potássio. Observou-se aumento do rendimento até um valor máximo, seguido de redução em doses mais elevadas de N (Figura 20c). O ponto de máximo rendimento de polpa estimado pela equação da regressão ocorre com aplicação de 386,6 kg ha⁻¹ de N. Nessa dose, estima-se que o rendimento de polpa apresente uma média de 72,1%, com intervalo de confiança de 95%, variando de 69,2 a 74,9%. A aplicação de K₂O não exerceu efeito significativo sobre essa variável, apresentando valor médio de 68,2%.

A resposta da produtividade à adubação nitrogenada ajustou-se a um modelo quadrático de regressão, com incremento até o ponto de máxima resposta estimado em 448,34 kg ha⁻¹ de N, no qual se obteve produtividade média estimada de 35,4 t ha⁻¹, com intervalo de confiança de 95% variando de 33,1 a 37,7 t ha⁻¹. A partir dessa dose de N, observa-se decréscimo na produtividade (Figura 20d). Em relação ao K₂O, a dose de 480 kg ha⁻¹ resultou em produtividade superior à dose de 240 kg ha⁻¹, promovendo um incremento corresponde a 10,7% (Tabela 8).

4.6 Parâmetros de qualidade do fruto

O resumo da análise de variância para as características de qualidade dos frutos demonstrou que o pH não apresentou efeito significativo em nenhum dos fatores estudados. A acidez titulável (AT), relação SS/AT, proteínas e açúcares totais foram influenciados pelas doses de N. A aplicação de K₂O teve efeito significativo sobre o SS/AT, vitamina C e proteínas. A interação entre as doses de N e K₂O foi significativa para sólidos solúveis (SS) e vitamina C (Tabela 9).

O pH do suco não foi influenciado por nenhum dos fatores de adubação, mantendo-se estável com média geral de 4,17 (Figura 21a). Já a acidez titulável respondeu linearmente às doses de nitrogênio (Figura 21b), apresentando um decréscimo estimado de 0,0001 g 100g⁻¹ de

ácido cítrico por kg de N aplicado. A aplicação de K₂O não influenciou a acidez titulável dos frutos, mantendo média geral de 0,56 g 100g⁻¹ de ácido cítrico (Tabela 9).

Para os sólidos solúveis (SS), houve interação significativa entre as doses de N e K₂O. Na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, o teor de SS manteve média de 14,81 °Brix, não apresentando variação em função das doses de N. Por outro lado, na dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, os dados ajustaram-se a um modelo quadrático, estimando teor médio de sólidos solúveis de 15,7 °Brix, com intervalo de confiança de 95% variando de 14,9 a 16,5 °Brix, na dose de máxima estimada de 365 kg ha⁻¹ de N. A partir dessa dose, observa-se decréscimo nos sólidos solúveis (Figura 21c).

Tabela 9 - Resumo da análise de variância do pH, acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS), relação SS/AT, vitamina C, proteínas e açúcares totais e frutos de abacaxi 'Pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K

Qualidade dos frutos					
F.V.	G.L.	pH	AT (g 100 g ⁻¹)	SS (°Brix)	SS/AT
Quadrado médio					
Bloco	3	0,0051 ^{ns}	0,0035 ^{ns}	2,2007 ^{ns}	2,6897 ^{ns}
N	3	0,0083 ^{ns}	0,0053*	7,0667**	27,6987**
K	1	0,0253 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	4,0330 ^{ns}	8,7300*
K: 240		4,20a	0,56a	14,43a	25,64b
K: 480		4,15a	0,56a	15,19a	27,10a
Quadrado médio					
N × K	3	0,0090 ^{ns}	0,0016 ^{ns}	3,9263*	5,6567 ^{ns}
Resíduo	21	0,0083	0,0011	0,9843	3,5620
C.V. (%)		2,1900	5,9900	6,6900	7,1600
Qualidade dos frutos					
		Vitamina C (mg 100 g ⁻¹)	Proteínas (mg 100 g ⁻¹)	Açúcares totais (g 100 g ⁻¹)	
Quadrado médio					
Bloco	3	2,11 ^{ns}	3.167,67 ^{ns}	6,85 ^{ns}	
N	3	15,87*	34.121,67***	17,11*	
K	1	37,70*	20.539,00**	0,79 ^{ns}	
K: 240		15,59b	343,35b	6,92a	
K: 480		17,76a	394,02a	6,60a	
Quadrado médio					
N × K	3	25,28**	1.841,33 ^{ns}	10,45 ^{ns}	
Resíduo	21	4,80	2099,00	0,47	
C.V. (%)		13,15	12,43	10,18	

^{ns}, ***, **, *, respectivamente, não significativo e significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F. Letras diferentes na mesma coluna em K: 240 e K:480 diferem as médias pelo teste F.

A relação SS/AT, que indica o equilíbrio entre doçura e acidez, foi favorecida por ambos os nutrientes. Em relação ao N, houve ajuste quadrático, com o ponto de máxima estimado pelo modelo na dose de 463,6 kg ha⁻¹ de N (Figura 21d). Nessa dose estima-se uma relação média de 27,9, com intervalo de confiança de 95% variando de 26,7 a 29,1. O potássio também favoreceu esta variável, a dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O proporcionou um SS/AT médio de 27,1, o que representa um aumento de 5,8% em relação aos 25,6 obtidos com a dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 9).

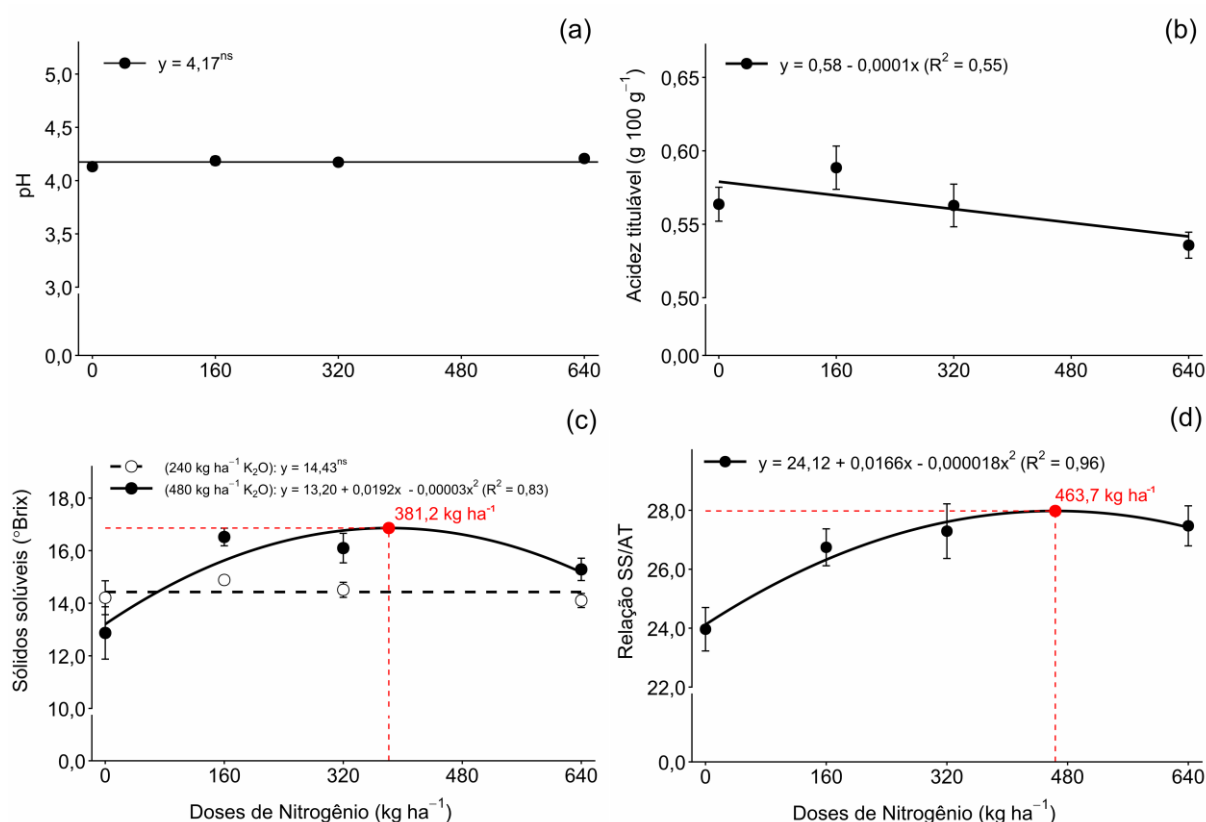


Figura 21 - pH (a), acidez titulável (b), sólidos solúveis (c) e SS/AT (d) em frutos de abacaxi 'pérola' em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

O teor de Vitamina C apresentou interação significativa. Na dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O, a resposta às doses de N foi quadrática, com teor máximo estimado de 17,9 mg 100g⁻¹, com intervalo de confiança de 95%, variando de 16,4 a 19,3 mg 100g⁻¹ na dose de 318,2 kg ha⁻¹ de N. Já na presença de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, as doses de nitrogênio não promoveram alterações significativas, mantendo os teores de Vitamina C na média de 16,7 mg 100g⁻¹ (Figura 22a).

O conteúdo de proteínas nos frutos apresentou ajuste quadrático, com teor máximo estimado pelo modelo com a dose de 493,9 kg ha⁻¹ de N, nessa dose, o teor médio de proteína

estimado foi de 432,4 mg 100 g⁻¹, com intervalo de confiança de 95%, variando de 403,1 a 461,6 mg 100g⁻¹ (Figura 22b). O potássio também foi determinante nesta variável, a dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O elevou o teor médio de proteínas para 394,0 mg 100g⁻¹, um incremento de 14,7% em relação à dose de 240 kg ha⁻¹ de K₂O (Tabela 9).

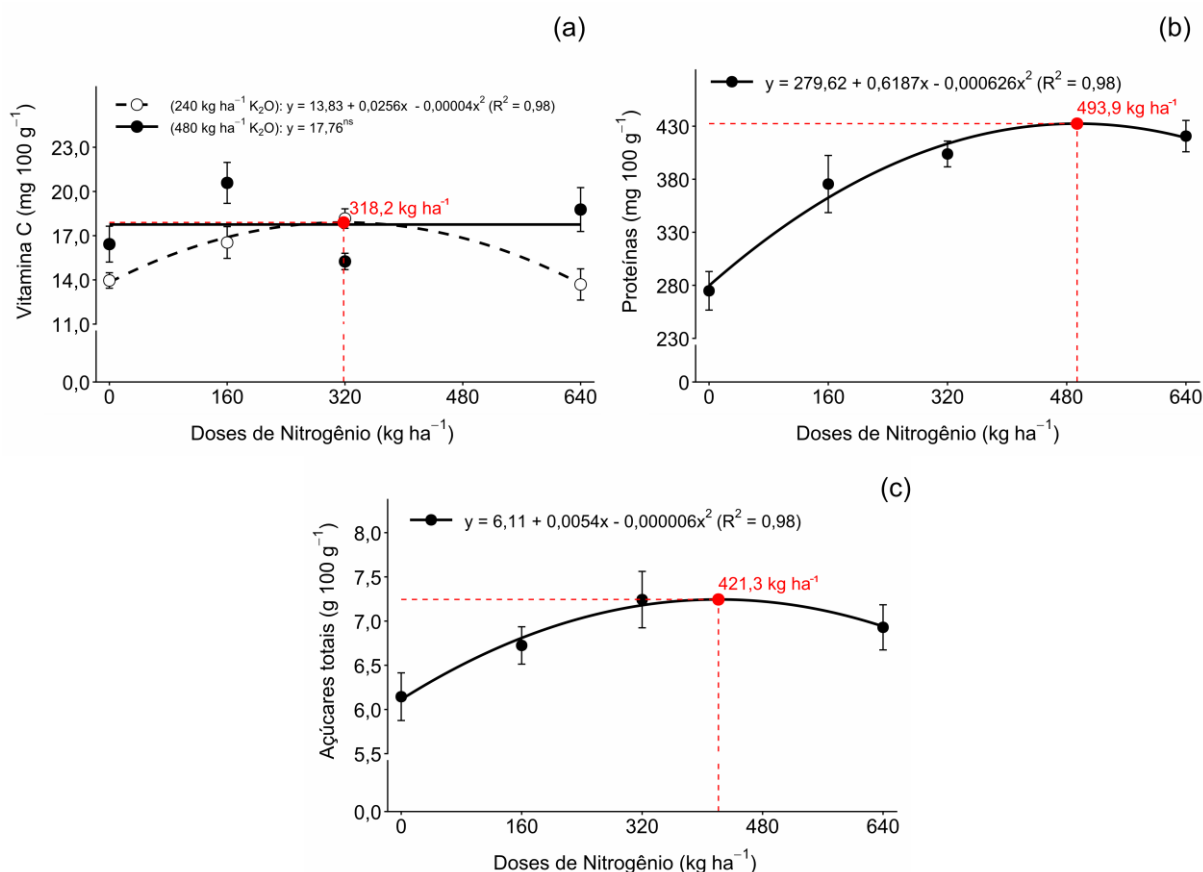


Figura 22 - Vitamina C (a), proteínas (b) e açúcares totais (c) em frutos de abacaxi ‘pérola’ em resposta a adubação de cobertura de N e K. As barras indicam o erro padrão. A marcação em vermelho indica a dose estimada de N que proporciona máxima resposta da variável. Fonte: o autor.

Os açúcares totais foram influenciados apenas pela dose de N, ajustando-se ao modelo quadrático. A máxima concentração foi estimada na dose de 421,3 kg ha⁻¹ de N, onde a concentração média de açúcares totais estimada foi de 7,2 g 100g⁻¹, com intervalo de confiança de 95%, variando de 6,8 a 7,7 g 100g⁻¹ (Figura 22c).

4.7 Análise multivariada para os parâmetros fisiológicos, bioquímicos, nutricionais, vegetativos, produção e qualidade de fruto

4.7.1 Análise de agrupamento hierárquico e componentes principais

A análise de agrupamento hierárquico (Figura 23a) permitiu identificar a formação de três grupos distintos de tratamentos, evidenciando padrões consistentes de similaridade em resposta às doses de N e K₂O aplicadas em cobertura. Esses agrupamentos foram corroborados pela análise de componentes principais (Figura 23b), a qual explicou conjuntamente 57,4% da variância total dos dados, sendo 32,0% atribuídos ao PC1 e 25,4% ao PC2, indicando adequada representação da estrutura multivariada do experimento.

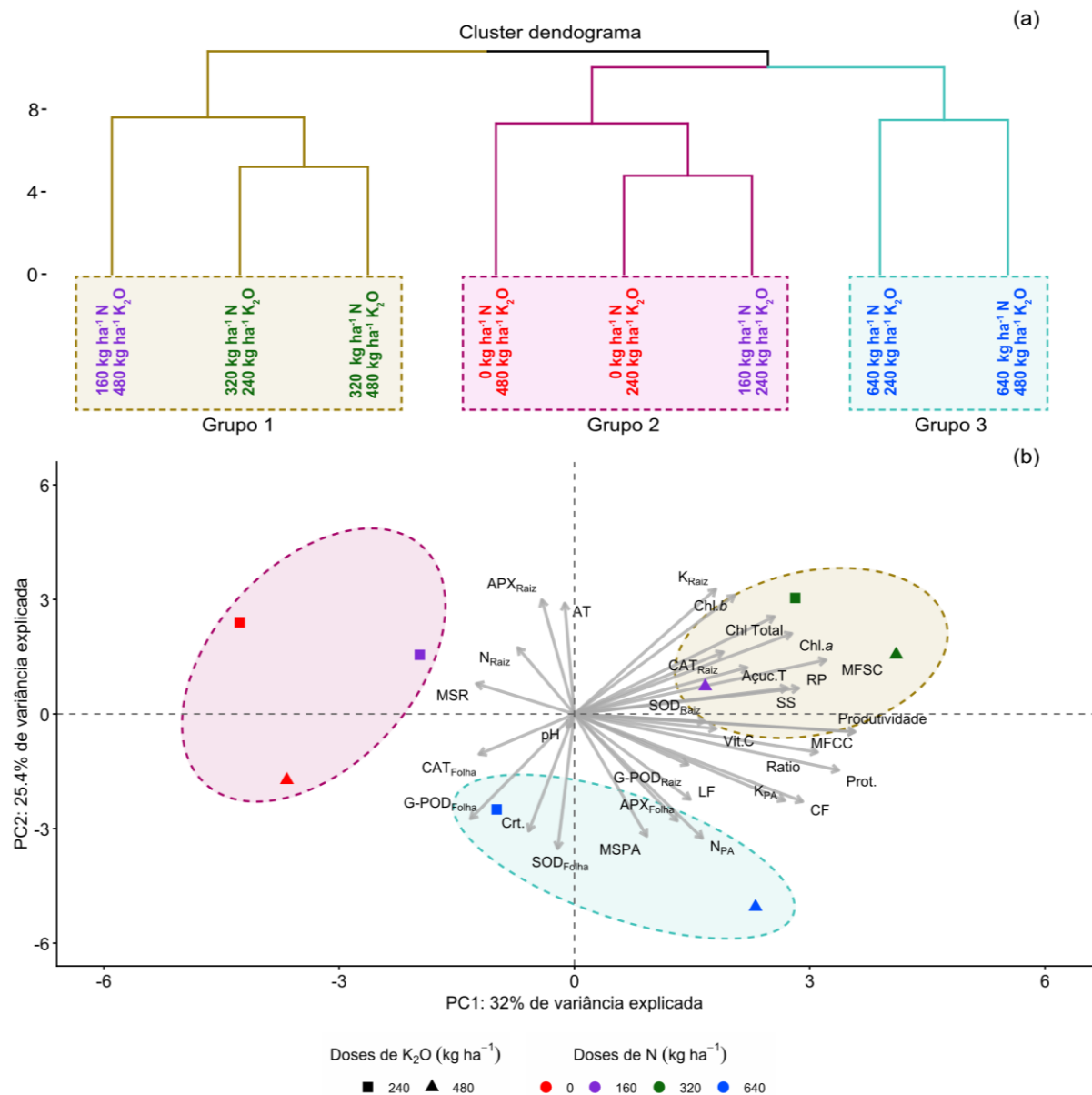


Figura 23 - Análise de agrupamento (a) e análise de componentes principais (b) para acúmulo de nitrogênio na parte aérea (N_{PA}) e raiz (N_{Raiz}); acúmulo de potássio na parte aérea (K_{PA}) e raiz (K_{Raiz}); teor de clorofila a (Chl.a), clorofila b (Chl.b), clorofila total (Chl.Total) e carotenoides (Crt.); atividade da enzima superóxido dismutase (SOD_{Folha}), catalase (CAT_{Folha}), ascorbato peroxidase (APX_{Folha}) e guaiacol

peroxidase ($G\text{-}POD_{\text{Folha}}$) nas folhas e superóxido dismutase (SOD_{Raiz}), catalase (CAT_{Raiz}), ascorbato peroxidase (APX_{Raiz}) e guaiacol peroxidase ($G\text{-}POD_{\text{Raiz}}$) nas raízes; comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR); massa do fruto com coroa (MFCC), massa do fruto sem coroa (MFSC), rendimento de polpa (RP) e produtividade; pH, acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS), SS/AT (Ratio), Vitamina C (Vit. C), proteínas (Prot.) e açúcares totais (Açuc. T) em plantas de abacaxizeiro ‘Pérola’ em resposta à adubação de cobertura de N e K.

O PC1 foi influenciado por variáveis ligadas a produção e qualidade dos frutos. As cinco variáveis com maior contribuição absoluta para esse componente foram produtividade e massa do fruto com coroa, ambas com loading de 0,303, seguidas por proteínas (0,285), massa do fruto sem coroa (0,271) e SS/AT (0,262). O PC2, foi determinado principalmente por variáveis relacionadas a atividade enzimática, acúmulo de nutrientes e crescimento vegetativo. As cinco maiores contribuições para esse componente foram observadas para atividade da superóxido dismutase na folha (0,299), acúmulo de potássio na raiz (0,277), acúmulo de nitrogênio na parte aérea (0,275), massa seca da parte aérea (0,271) e teor de clorofila *b* (0,263).

O primeiro grupo identificado na análise de agrupamento hierárquico (Figura 23a), apresentou maior associação à região positiva do PC1, reuniu tratamentos com as combinações das doses de 160 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O , 320 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O e 320 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O , que apresentaram maior correlação com produtividade, massa dos frutos e atributos de qualidade. Visualmente, esses tratamentos exibiram maior biomassa vegetal, folhas mais longas, com coloração verde mais intensa e aparência mais uniforme, além de frutos maiores e mais homogêneos (Figura 24).

O segundo grupo (Figura 23a), localizado predominantemente na região negativa do PC1 e positiva do PC2, foi composto pelos tratamentos 0 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O , 0 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O e 160 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O . Esses tratamentos apresentaram maior associação com variáveis relacionadas ao sistema antioxidante e ao acúmulo radicular de nutrientes, sugerindo uma condição de restrição nutricional, na qual ocorre priorização de mecanismos de defesa em detrimento do crescimento vegetativo e da produção.

Esse comportamento foi visualmente confirmado pela presença de plantas com menor vigor, folhas mais curtas e cloróticas e frutos de menor tamanho (Figura 24), compatíveis com sintomas típicos de deficiência nitrogenada e com a menor correlação desses tratamentos com as variáveis produtivas no PC1.

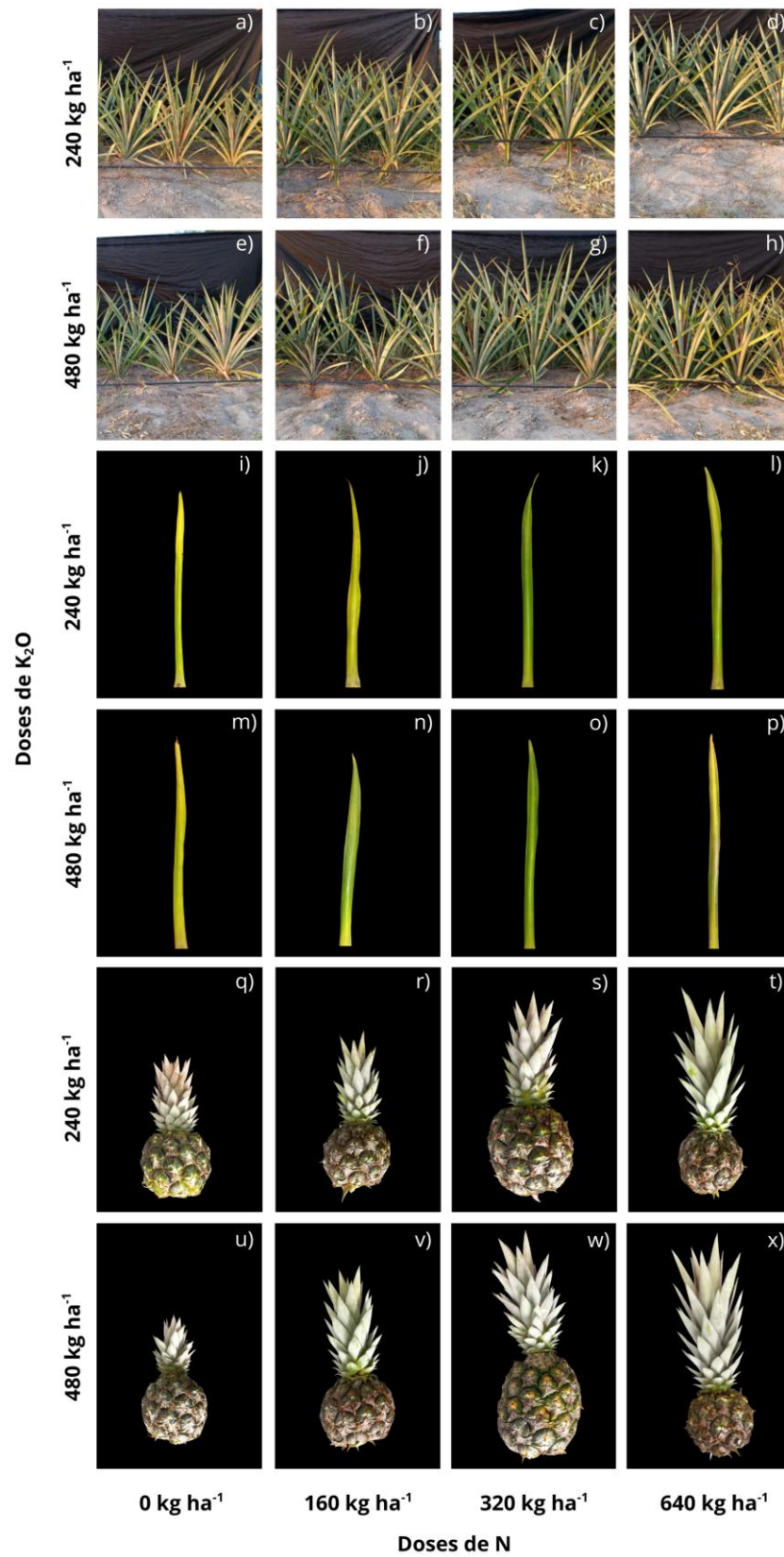


Figura 24 - Registro fotográfico das plantas e folha 'D' aos 360 DAT e frutos aos 480 DAT submetidas às doses de N e K_2O . Fonte: o autor.

O terceiro grupo (Figura 23a), associado aos tratamentos 640 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O e 640 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O posicionou-se principalmente na região negativa do PC2, apresentando maior correlação com enzimas antioxidantes foliares. Esse padrão indica que o excesso de nitrogênio promoveu desequilíbrio fisiológico, com intensificação das respostas antioxidantes como mecanismo de ajuste ao estresse metabólico, sem reflexos positivos proporcionais sobre a produtividade.

Visualmente, esses tratamentos apresentaram plantas com crescimento vegetativo excessivo, folhas maiores, porém com coloração clorótica, além de frutos menores associados a coroas mais desenvolvidas (Figura 24), evidenciando desbalanceamento na partição de assimilados entre órgãos vegetativos e reprodutivos.

4.7.2 Análise de rede de correlação

Na Figura 25 são apresentadas as redes de correlação correspondentes aos três grupos definidos pela análise de agrupamento hierárquico (Figura 23a), evidenciando a estrutura de interdependência entre variáveis de produção, qualidade de frutos, nutricionais, fisiológicas e bioquímicas em diferentes combinações de doses de N e K_2O . De modo geral, observa-se que a complexidade, densidade e padrão das conexões variaram entre os grupos, refletindo distintos estados funcionais das plantas.

No Grupo 1 (Figura 25a), associado às doses de 160 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O , 320 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O e 320 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O , destaca-se a forte integração entre os conjuntos de produção, fisiológicos e nutricional, indicando coordenação metabólica favorável ao crescimento e à formação dos frutos. Esse padrão corrobora os resultados da PCA, na qual esses tratamentos se posicionaram na região positiva do PC1, caracterizada por maior associação com produtividade e atributos de qualidade.

A presença de correlações positivas consistentes entre clorofilas, massa de frutos e eficiência de uso de nutrientes sugere preservação do aparato fotossintético e alocação eficiente de assimilados para os órgãos reprodutivos, compatível com o maior vigor vegetativo e maior homogeneidade de frutos observados visualmente (Figura 24).

No Grupo 2 (Figura 25b), composto pelos tratamentos 0 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O , 0 kg ha^{-1} de N + 480 kg ha^{-1} de K_2O e 160 kg ha^{-1} de N + 240 kg ha^{-1} de K_2O , pode-se observar redução das conexões entre variáveis de produção e os demais conjuntos de variáveis. Em contraste, há intensificação das interações envolvendo o conjunto de atividade enzimática,

inclusive correlações negativas com as variáveis do desempenho produtivo e qualidade dos frutos.

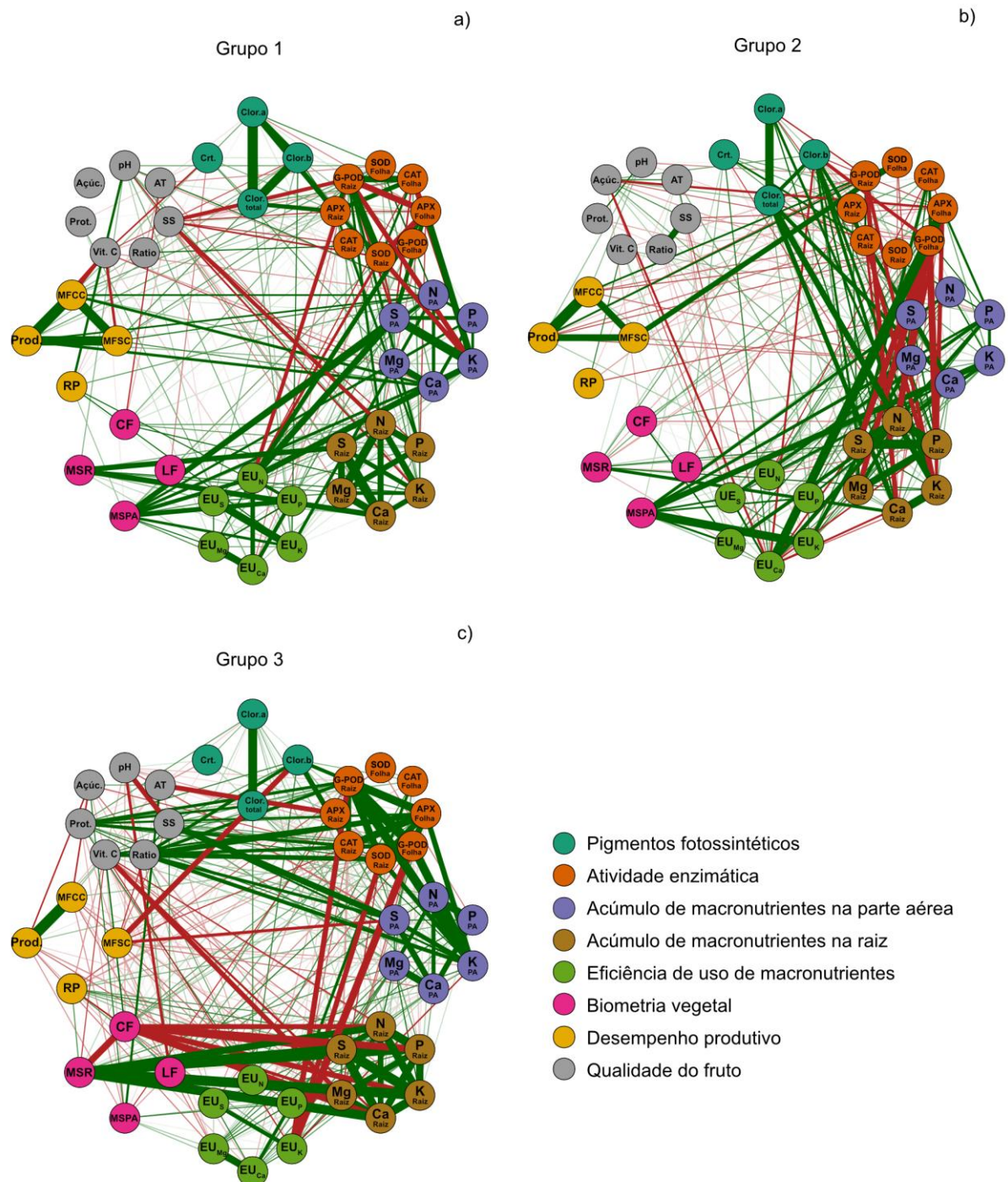


Figura 25 - Rede de correlação para teor de clorofila a (Chl.a), clorofila b (Chl.b), clorofila total (Chl.Total) e carotenoides (Crt.); atividade da enzima superóxido dismutase (SOD_{Folha}), catalase (CAT_{Folha}), ascorbato peroxidase (APX_{Folha}) e guaiacol peroxidase (G-POD_{Folha}) nas folhas e superóxido dismutase (SOD_{Raiz}), catalase (CAT_{Raiz}), ascorbato peroxidase (APX_{Raiz}) e guaiacol peroxidase (G-POD_{Raiz}) nas raízes; acúmulo de nitrogênio (N_{PA}), fósforo (P_{PA}), potássio (K_{PA}), cálcio (Ca_{PA}), magnésio (Mg_{PA}) e enxofre (S_{PA}) na parte aérea; acúmulo de nitrogênio (N_{Raiz}), fósforo (P_{Raiz}), potássio (K_{Raiz}), cálcio (Ca_{Raiz}), magnésio (Mg_{Raiz}) e enxofre (S_{Raiz})

na raiz (N_{Raiz}); eficiência de uso de nitrogênio (EU_N), fósforo (EU_P), potássio (EU_K), cálcio (EU_{Ca}), magnésio (EU_{Mg}) e enxofre (EU_S); comprimento da folha (CF), largura da folha (LF), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR); massa do fruto com coroa (MFCC), massa do fruto sem coroa (MFSC), rendimento de polpa (RP) e produtividade (Prod.); pH, acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS), SS/AT (Ratio), Vitamina C (Vit. C), proteínas (Prot.) e açúcares totais (Açu. T) em plantas de abacaxizeiro ‘Pérola’ em resposta à adubação de cobertura de N e K.

Esse arranjo sugere um estado fisiológico de restrição nutricional, no qual a planta prioriza mecanismos de defesa oxidativa e estratégias de aquisição de nutrientes em detrimento do crescimento e da formação de frutos. Tal configuração sustenta o posicionamento desse grupo desse grupo na região negativa do PC1 e positiva do PC2 da PCA, associado a maior contribuição de variáveis relacionadas ao estresse metabólico, principalmente do sistema radicular.

Por sua vez, o Grupo 3 (Figura 25c), associado às maiores doses de N aplicadas e situado principalmente na região negativa do PC2, caracteriza-se por forte conectividade entre o sistema antioxidante foliar e radicular e o acúmulo de nutrientes, porém com menor integração desses atributos com as variáveis de desempenho produtivo. Esse padrão indica que o excesso de N promove desbalanceamento fisiológico, com ativação intensa das enzimas antioxidantes e redistribuição de nutrientes, sem reflexo proporcional em produtividade.

Esse comportamento indica desequilíbrio fisiológico, no qual o estímulo ao crescimento vegetativo não se traduz em ganhos proporcionais de produtividade, sendo acompanhado por maior custo metabólico para manutenção da homeostase celular. Esse padrão é coerente com a posição desse grupo na região negativa do PC2 e com as observações visuais de crescimento vegetativo excessivo, folhas cloróticas e frutos menores, evidenciando desbalanceamento na partição de assimilados entre órgãos vegetativos e reprodutivos.

4.7.3 Aplicação da função de desejabilidade

A otimização multivariada por meio da função de desejabilidade permitiu integrar, em um único índice, o desempenho produtivo, de qualidade dos frutos, nutricional, fisiológico e bioquímico do abacaxizeiro ‘Pérola’, submetido a diferentes doses de N e K_2O . Entre as variáveis associadas ao eixo PC1, a massa do fruto sem coroa (Figura 26e), o rendimento de polpa (Figura 26i) e a clorofila *a* (Figura 26k) apresentaram desejabilidade máxima ($DR = 1,00$), com valores preditos de 613,19 g, 72,02% e 1289,48 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca,

respectivamente. A SS/AT (Figura 26g) apresentou valor predito de 27,49 e desejabilidade de 0,99. A produtividade (Figura 26a) apresentou valor predito de 34,72 t ha⁻¹, com desejabilidade de 0,92, enquanto a concentração de proteínas no fruto (Figura 26c) apresentou valor predito de 423,66 e desejabilidade de 0,81.

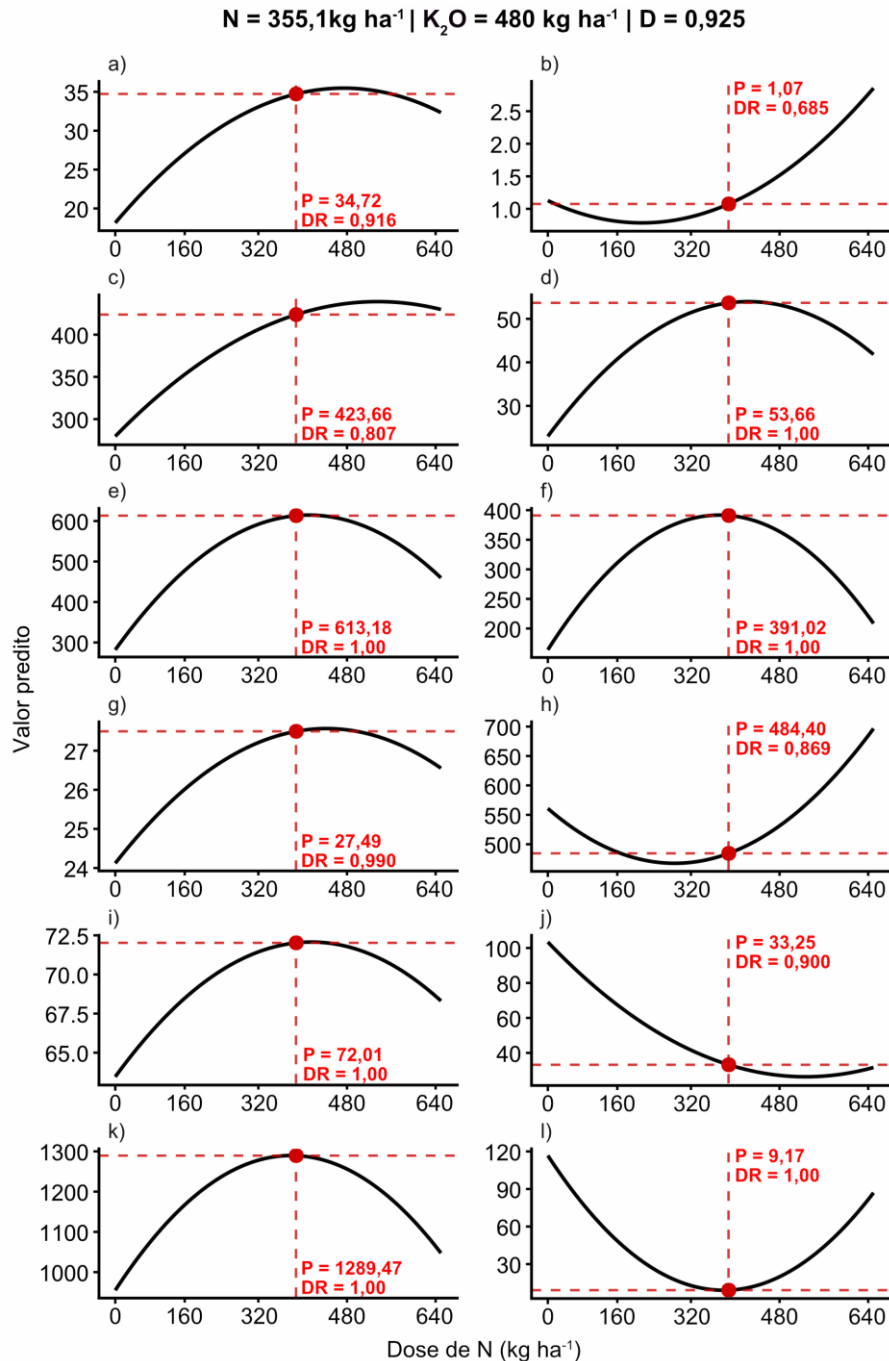


Figura 26 - Respostas previstas (P) na dose ótima de N (355,1 kg ha⁻¹) e K₂O (480 kg ha⁻¹) da produtividade (a), atividade da superóxido dismutase na folha (b), teores de proteínas (c), acúmulo de potássio na raiz (d), massa do fruto sem coroa (e), clorofila b (f), SS/AT (g), carotenoides (h), rendimento de polpa (i), atividade da ascorbato peroxidase na raiz (j), clorofila a (k), e atividade da guaiacol peroxidase na folha (l) pela função de desejabilidade. DR: Desejabilidade da resposta para os valores de cada variável. D = 0,925: Desejabilidade geral do modelo.

No eixo PC2, o acúmulo de potássio na raiz (53,67 mg por planta) (Figura 26d) e a clorofila b (391,02 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca) (Figura 26f) apresentaram desejabilidade igual a 1,00. A atividade da guaiacol peroxidase na folha (Figura 26l) também apresentou desejabilidade máxima (DR = 1,00), com valor predito de 9,17 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína. A ascorbato peroxidase na raiz (Figura 26j) apresentou valor predito de 33,25 $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína e desejabilidade de 0,90, enquanto o teor de carotenoides (Figura 26h) apresentou valor predito de 484,41 $\mu\text{g g}^{-1}$ de massa seca e desejabilidade de 0,87. A superóxido dismutase na folha (Figura 26b) apresentou desejabilidade de 0,69 U mg^{-1} de proteína, sendo a menor entre as variáveis consideradas na otimização.

De modo geral, a combinação ótima de N e K₂O resultou em desejabilidades individuais predominantemente elevadas, com valores classificados entre muito bons e ótimos para a maioria das variáveis avaliadas, refletindo elevada desejabilidade global do sistema. Dessa forma, a função de desejabilidade indicou como combinação ótima a dose de 355,1 kg ha⁻¹ de N associada a 480 kg ha⁻¹ de K₂O, resultando em desejabilidade global de 0,925 (Figura 26).

5 DISCUSSÃO

A produtividade e a qualidade do abacaxizeiro são governadas pela capacidade da planta em absorver e metabolizar nutrientes em momentos críticos do seu ciclo. O nitrogênio e o potássio são os elementos absorvidos em maiores quantidades pela cultura, desempenhando papéis antagônicos e sinérgicos que definem desde a arquitetura foliar até o metabolismo antioxidante (Rios *et al.*, 2018a). O ajuste dessas doses é fundamental, pois, como observado na literatura recente, o excesso de fertilizantes não apenas onera o sistema produtivo, mas pode induzir desordens fisiológicas e reduzir a eficiência de uso dos nutrientes (Cunha *et al.*, 2021).

Nessa perspectiva, o presente estudo avaliou a interação entre doses de N e K₂O aplicadas em cobertura na cultura do abacaxizeiro ‘Pérola’. As respostas obtidas demonstraram que o equilíbrio entre estes nutrientes é determinante não apenas para a produção de biomassa, mas para a regulação da atividade enzimática e qualidade físico-química dos frutos, conforme evidenciado pela análise multivariada e pela função de desejabilidade (Figura 23, Figura 25 e Figura 26).

5.1 O fornecimento de doses distintas de nitrogênio e potássio modulam diferencialmente o crescimento vegetativo e o aparato fotossintético do abacaxizeiro ‘Pérola’

A regulação da atividade metabólica das plantas depende do equilíbrio nutricional, sendo nitrogênio e potássio os elementos de maior demanda no abacaxizeiro por sustentarem processos vitais como fotossíntese, síntese de carboidratos e crescimento (Rios *et al.*, 2018a; Wang *et al.*, 2024). Nesse contexto, o manejo de N e K₂O avaliado neste estudo evidencia funções distintas e complementares desses nutrientes na fisiologia do abacaxizeiro ‘Pérola’.

O padrão observado para a massa seca da parte aérea e para o comprimento da folha ‘D’ em resposta ao N (Figura 10a; Figura 10b) é consistente com o papel estrutural e funcional do nutriente no metabolismo vegetal. O N integra aminoácidos, proteínas e pigmentos fotossintéticos e sustenta a síntese de enzimas-chave, como a ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), diretamente relacionada à assimilação de CO₂ na fotossíntese (Cao *et al.*, 2025).

Em contraste, a sensibilidade negativa do sistema radicular ao incremento da adubação potássica sugere que o suprimento elevado de K₂O pode impor limitações ao crescimento das raízes. A redução de 32,8% na biomassa radicular sob 480 kg ha⁻¹ de K₂O (Fig. 13b) é compatível com aumento do estresse osmótico na rizosfera ou efeitos associados ao íon cloreto

quando a fonte empregada é KCl, condição recorrente em adubações potássicas intensas (Xu *et al.*, 2020). Esse comportamento no ambiente radicular contrasta com o efeito observado na parte aérea, indicando que, embora o K favoreça o transporte de solutos e a manutenção do turgor em tecidos foliares, seu excesso no ambiente radicular pode comprometer a absorção de água e a emissão de novas raízes. Em termos de manejo, esse quadro reforça a necessidade de maior parcelamento da adubação para reduzir o índice salino no entorno das raízes (Silva *et al.*, 2021; El-Mageed *et al.*, 2022).

A resposta quadrática observada para o teor de clorofila (Figura 17a; Figura 17b; Figura 17c) indica que desvios do suprimento adequado de N, tanto por deficiência quanto por excesso, podem desorganizar a síntese e estabilidade desses compostos. Sob baixas doses, a redução do teor de clorofila é compatível com o fato de o N ser componente da molécula de clorofila e, portanto, determinante para a absorção de energia luminosa e para o funcionamento do aparato fotossintético (Tantray; Bashir; Ahmad, 2020). Nessa condição, a limitação de N tende a restringir a biogênese do sistema fotossintético, reconhecido como o principal reservatório de N na planta, concentrando parcela expressiva do N foliar total, o que se expressa visualmente como clorose (Figura 24i, m) (Evans; Clarke, 2019).

Em doses elevadas, o declínio no acúmulo de clorofila pode estar associado, entre outros fatores, às características da fonte nitrogenada. O excesso de amônio pode induzir toxicidade, restringindo crescimento e síntese de pigmentos (Wang *et al.*, 2024). Nesse contexto, é possível supor que o fornecimento de N em níveis muito acima da demanda da cultura tenha intensificado a necessidade de esqueletos de carbono e de energia para sua assimilação, contribuindo para um quadro de estresse metabólico. Nessa condição, o suprimento excessivo de N pode alterar a partição de recursos na planta, afetar a regulação do metabolismo secundário e reduzir a eficiência de direcionamento do nutriente para componentes estruturais do aparato fotossintético, resultando em menor acúmulo de pigmentos (Oleszkiewicz; Kruczek; Baranski, 2021).

Quanto ao comportamento dos carotenoides (Figura 17d), a resposta observada é compatível com a reorganização do aparato fotossintético sob estresse nutricional por N, clorofila e carotenoides tendem a diminuir, porém a clorofila apresenta declínio mais rápido, elevando a razão carotenoides/clorofila (Wang *et al.*, 2024). Essa mudança reflete redução da eficiência de captação de luz e maior ênfase em mecanismos fotoprotetores (Yu *et al.*, 2023). Nesse sentido, os carotenoides assumem papel central na fotoproteção por sua estabilidade e atuação no ciclo das xantofilas, favorecendo a dissipação térmica do excesso de energia via extingüimento não fotoquímico, reduzindo a excitação do fotossistema II e prevenindo danos

foto-oxidativos às membranas dos tilacoides em condições nutricionais adversas (Peralta-Sánchez *et al.*, 2023).

5.2 A adubação nitrogenada e potássica regula a ativação do sistema antioxidante em folhas e raízes

O excesso de N, embora promova o aumento da massa seca da parte aérea (Figura 10a) por meio de maior expansão foliar e alocação de biomassa vegetativa, parece induzir danos oxidativos significativos nas plantas de abacaxizeiro, como evidenciado pela maior atividade enzimática antioxidante em doses elevadas. Essa aparente contradição pode ser atribuída à alta demanda metabólica por esqueletos de carbono e moléculas energéticas, como ATP e NADPH, necessárias para a assimilação do excesso de nitrogênio assimilado, o que desvia recursos carbônicos da fotossíntese para vias de biossíntese nitrogenada e reduz a disponibilidade de carbono para manutenção redox (Cun *et al.*, 2022).

Em condições de excesso de nitrogênio, a maior disponibilidade de N tende a sustentar altas taxas de captura de energia luminosa e de transporte eletrônico, sem que haja aumento proporcional na assimilação de carbono, o que intensifica a formação de superóxido e peróxido de hidrogênio nos complexos da CTE e em outros compartimentos redox-sensíveis. Nessa situação, o descompasso entre excitação fotoquímica e demanda metabólica leva à fotoinibição parcial e à sobrecarga redox, obrigando a ativação de rotas dissipativas e do sistema antioxidante enzimático para evitar a oxidação de lipídios de membrana, proteínas e ácidos nucleicos (Cisse *et al.*, 2020).

Por outro lado, nas doses mais baixas de N, a limitação na assimilação de nitrogênio compromete a síntese de proteínas, pigmentos e componentes essenciais do aparato fotossintético, reduzindo a capacidade de utilização da energia absorvida e favorecendo o acúmulo de ERO. Nesses cenários de N em excesso ou em deficiência, a maior atividade de SOD, CAT, APX e G-POD evidencia a tentativa das plantas de remover o excesso de ERO gerado pelo transporte eletrônico desbalanceado, convertendo o superóxido inicialmente formado em H_2O_2 e, em seguida, em água e oxigênio, minimizando danos oxidativos (Chen *et al.*, 2024).

Estudos em outras culturas mostram que a aplicação excessiva de nitrogênio pode deprimir ou desregular a capacidade antioxidante e, ao mesmo tempo, aumentar o acúmulo de ERO e produtos de peroxidação lipídica, enquanto a deficiência de N também está associada ao aumento do estresse oxidativo, reforçando que o afastamento da faixa nutricional ótima de

N perturba a homeostase redox e compromete a integridade funcional do aparato fotossintético (Cisse *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2024).

Dessa forma, os resultados obtidos em abacaxizeiro ‘Pérola’ indicam que tanto as doses baixas quanto as elevadas de N convergem para um cenário de estresse oxidativo mediado por falhas na coordenação entre transporte de elétrons, assimilação de carbono e capacidade de detoxificação de ERO, exigindo forte ajuste do metabolismo antioxidante para manutenção da homeostase celular (Wang; Chen; Wu, 2021; Belal *et al.*, 2023).

A atividade da superóxido dismutase refletiu a resposta inicial do sistema antioxidante às variações no estado redox celular, sendo modulada principalmente pelas doses de nitrogênio nas folhas (Figura 18a) e pela interação entre N e K₂O no sistema radicular (Figura 18b). A elevação da atividade da SOD sob condições de baixo e alto suprimento de N indica intensificação da geração do ânion superóxido (O₂⁻), possivelmente associada a limitações na assimilação de N em condições de deficiência e a desequilíbrios metabólicos decorrentes do excesso desse nutriente (Tewari; Kumar; Sharma, 2007).

No sistema radicular, a maior atividade da SOD sob a dose de 480 kg ha⁻¹ de K₂O, quando associado as doses baixas e elevadas de N (Figura 18b), sugere que o potássio modulou a sensibilidade das raízes ao estresse oxidativo, intensificando mecanismos de controle redox quando o balanço nutricional se tornou desfavorável. Esse comportamento é consistente com o papel do K⁺ na estabilização das membranas celulares, na manutenção do potencial eletroquímico e na regulação indireta da geração e detoxificação de espécies reativas de oxigênio (Tewari; Kumar; Sharma, 2007; Ahanger *et al.*, 2015; Shams *et al.*, 2024).

A SOD foliar mostrou associação positiva forte com o acúmulo de N na parte aérea ($r = 0,67^{***}$), além de correlação com massa seca da parte aérea ($r = 0,54^{***}$) e carotenoides ($r = 0,46^{**}$), e associações negativas com clorofila b ($r = -0,54^{**}$) e clorofila total ($r = -0,41^{*}$). Esse arranjo de correlações sustenta a interpretação de que o incremento da atividade de SOD está vinculado a um estado metabólico sob estresse, comum quando o crescimento vegetativo e o acúmulo de N se intensificam sem correspondência funcional nos atributos fotossintéticos (Ru *et al.*, 2023).

As respostas de CAT, APX e G-POD indicaram atuação coordenada do sistema de remoção de H₂O₂, com modulação dependente do balanço entre N e K₂O. A catalase exibiu padrão consistente em folhas e raízes, compatível com sua função predominante na decomposição direta de H₂O₂, particularmente em condições nas quais a carga oxidativa se eleva sob desequilíbrios de N (Anjum *et al.*, 2016; Rajput *et al.*, 2021).

A ascorbato peroxidase apresentou elevada sensibilidade ao manejo nutricional, coerente com sua participação no ciclo ascorbato-glutationa e com sua relevância na proteção de compartimentos com intensa geração de H_2O_2 , especialmente quando o metabolismo fotossintético é submetido a restrições impostas por deficiência ou excesso de N (Kameoka *et al.*, 2021; Corpas; González-Gordo; Palma, 2024).

A guaiacol peroxidase, por sua vez, acompanhou o aumento do estresse oxidativo e, adicionalmente, sugere envolvimento de processos associados à modificação da parede celular, o que é compatível com respostas adaptativas mais persistentes sob estresse nutricional, sobretudo no sistema radicular (Polle; Otter; Seifert, 1994; Lee *et al.*, 2007; Kováčik *et al.*, 2014).

A interação com K_2O foi mais evidente no compartimento radicular, indicando que o potássio condiciona a magnitude e o padrão de ativação antioxidante nas raízes quando o balanço nutricional se torna desfavorável. Essa modulação é consistente com as funções do K^+ na integridade de membranas, no controle do potencial eletroquímico e na regulação indireta da suscetibilidade ao estresse oxidativo, influenciando a necessidade de ajuste enzimático em condições de maior exigência metabólica (Tewari; Kumar; Sharma, 2007; Ahanger *et al.*, 2015; Shams *et al.*, 2024).

Em conjunto, os resultados indicam que o sistema antioxidante do abacaxizeiro ‘Pérola’ é altamente responsivo ao manejo de N e K_2O e que sua ativação representa um marcador fisiológico de desequilíbrio nutricional, com implicações sobre o funcionamento do aparato fotossintético e a alocação de recursos metabólicos, sem correspondência direta e proporcional com incrementos de produtividade (Wang; Chen; Wu, 2021; Belal *et al.*, 2023).

5.3 O equilíbrio N/K regula o acúmulo de macronutrientes entre parte aérea e raízes no abacaxizeiro ‘Pérola’

O padrão de resposta do acúmulo de N na parte aérea ao suprimento de nitrogênio (Figura 12a) sustenta que o manejo de N condiciona diretamente a alocação do nutriente ao compartimento vegetativo, coerente com sua incorporação em proteínas fotossintéticas, enzimas metabólicas e constituintes estruturais associados ao crescimento (Kölln *et al.*, 2023). Em contrapartida, a ausência de alteração no acúmulo radicular de N (Figura 12b) indica forte partição preferencial para os órgãos aéreos, compatível com a relação fonte-dreno típica de plantas em crescimento vegetativo, nas quais a parte aérea atua como dreno metabólico prioritário (Chen *et al.*, 2023).

No caso do fósforo (Figura 12c), a resposta do acúmulo na parte aérea ao N sugere predominância de um efeito de diluição em níveis intermediários, associado ao crescimento vegetativo estimulado pelo nitrogênio sem incremento proporcional do conteúdo de P (Schleuss *et al.*, 2020). A elevação do acúmulo de P sob maior suprimento de K₂O (Tabela 4), por sua vez, é compatível com um sinergismo funcional entre K e P, considerando que o K⁺ participa da otimização do metabolismo energético e da atividade de bombas H⁺-ATPase, com implicações sobre processos de transporte dependentes de ATP (Wang; Chen; Wu, 2021; Wegner *et al.*, 2025).

A interação observada para o acúmulo de K na parte aérea (Figura 12e) indica que a intensificação da demanda metabólica induzida pelo N se traduz em maior incorporação de K⁺ apenas quando sua disponibilidade é elevada, caracterizando sinergismo condicional entre N e K (Coskun; Britto; Kronzucker, 2017). Essa interpretação é consistente com o papel do K na síntese proteica e na expansão celular via regulação osmótica, processos que acompanham o incremento de crescimento quando o N estimula a atividade metabólica (Srivastava *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2025).

No sistema radicular, o padrão quadrático do acúmulo de K e sua redução sob maior K₂O (Tabela 4) sugerem um ajuste de partição determinado pela força relativa de dreno entre raízes e parte aérea, com priorização do compartimento aéreo em condições de maior disponibilidade do nutriente, onde o K⁺ sustenta processos associados ao desempenho fisiológico e produtivo (Li *et al.*, 2025).

As respostas de Ca, Mg e S, indicam que a dinâmica de acúmulo é resultado da interação entre suprimento, mobilidade e força de dreno da parte aérea (Coskun; Britto; Kronzucker, 2017). Para o cálcio (Figura 13a), o aumento do acúmulo na parte aérea sob maior suprimento de N é compatível com intensificação do crescimento e do fluxo transpiratório, determinantes do transporte de Ca²⁺ para tecidos aéreos, dada sua mobilidade extremamente limitada no floema (Carrasco-Cuello *et al.*, 2024).

Em raízes (Figura 13b), o padrão sugere maior retenção ou demanda local em níveis intermediários e, sob suprimento elevado de N, maior direcionamento do Ca ao compartimento aéreo (Wang *et al.*, 2023). A redução do acúmulo radicular de Ca sob alta dose de K₂O (Tabela 4) reforça o antagonismo competitivo, no qual o excesso de K reduz a entrada de Ca²⁺ por competição em sítios de transporte e alterações no potencial eletroquímico da membrana plasmática, com implicações para funções estruturais e de sinalização no sistema radicular (Wdowiak; Podgórska; Szal, 2024).

Para o magnésio (Figura 13c), o aumento do acúmulo na parte aérea com N, é coerente com a maior demanda por Mg^{2+} associada ao crescimento e ao metabolismo fotossintético, dada sua função na clorofila e como ativador enzimático (Xie *et al.*, 2021). Em contraste, a redução do acúmulo radicular sob maior K_2O (Tabela 4) é consistente com competição catiônica entre K^+ e Mg^{2+} , atribuída à maior afinidade do K^+ por sistemas de transporte sob altas concentrações externas (Li *et al.*, 2018; Garcia *et al.*, 2022).

Para o enxofre (Figura 13e), o aumento do acúmulo na parte aérea quando doses de N foram combinadas à maior dose de K_2O reforça a interdependência metabólica entre N e S e a relevância do balanço N:S para a síntese proteica via aminoácidos sulfurados (Jobe *et al.*, 2019; Kumar; Kumar; Mohapatra, 2021). A ausência de resposta do S no compartimento radicular ao N (Figura 13f), associada à redução sob maior K_2O (Tabela 4), sugere maior sensibilidade do acúmulo radicular a restrições impostas pela competição iônica, sem afetar a resposta expressa no compartimento aéreo (Li; Gao; Yang, 2020; Serag; El-Samet; Seadh, 2022; Cao *et al.*, 2025).

Sob condições ótimas previstas pela função de desejabilidade (Figura 26), o ranking de acúmulo na parte aérea foi $K > N > Ca > Mg > S > P$, que evidencia K e N como nutrientes de maior demanda no compartimento vegetativo, coerentes com suas funções no crescimento, fotossíntese e suporte metabólico ao desenvolvimento da planta (Xu *et al.*, 2020; Kölln *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2025). Nessa condição, os valores preditos foram de 11.163,97, 4.433,32, 3.993,48, 1.046,02, 889,98 e 854,64 mg por planta, respectivamente. No sistema radicular, os valores preditos foram substancialmente inferiores e seguiram o ranking $N > K > Ca > S > P > Mg$, com 49,69, 48,49, 28,13, 14,79, 7,04 e 3,57 mg por planta, respectivamente, reforçando a forte partição de nutrientes para a parte aérea sob condições de manejo favoráveis.

A eficiência de uso dos nutrientes, constitui um índice integrado da capacidade da planta em converter os nutrientes absorvidos em biomassa. Esse parâmetro é particularmente relevante do ponto de vista agrônômico, pois reflete não apenas a absorção, mas o aproveitamento metabólico dos nutrientes sob diferentes condições de suprimento (Prado, 2020). Nesse contexto, a estabilidade da eficiência de uso do N frente ao aumento das doses de N (Figura 16a) sugere proporcionalidade entre suprimento e produção de biomassa, enquanto o incremento promovido pela maior dose de K_2O (Tabela 5) indica efeito do potássio sobre o aproveitamento metabólico do N (Cao *et al.*, 2025).

O aumento da eficiência de uso do P com aumento das doses de N (Figura 16b) é compatível com a interdependência metabólica entre N e P em rotas associadas à transferência de energia e ao metabolismo fosfatado (Schleuss *et al.*, 2020; Vázquez *et al.*, 2023). As

interações envolvendo K e Ca indicam que a eficiência de uso é condicionada pelo equilíbrio nutricional, no entanto, a estabilização da eficiência de uso do K sob maior disponibilidade de K_2O (Figura 16c) contrasta com a redução da eficiência de uso do Ca sob aumento de N nessa condição (Figura 16d).

Essas interações demonstram o reflexo tanto do antagonismo entre K^+ e Ca^{2+} na absorção quanto da maior diluição do Ca causada pelo intenso crescimento vegetativo promovido pelo N (Qu; Han, 2022). Por fim, o aumento da eficiência de uso de Mg (Figura 16e) e S (Figura 16f) com aumento das doses de N sugere intensificação do retorno em crescimento por unidade desses nutrientes em um cenário de metabolismo associado ao crescimento (Jobe *et al.*, 2019; Ruiz; Sánchez; Rodríguez, 2025).

5.4 O manejo equilibrado de N e K maximiza a produtividade e melhora a qualidade dos frutos

O conjunto de respostas de produção e qualidade dos frutos indica que o desempenho agrônômico do abacaxizeiro ‘Pérola’ depende de um equilíbrio funcional N/K, em que o N sustenta a formação estrutural e o metabolismo assimilatório, enquanto o K regula processos determinantes para a partição de assimilados e a estabilidade do enchimento do fruto (Prado, 2020). A análise multivariada (Figura 23a) reforça esse raciocínio ao discriminar um agrupamento associado ao eixo de maior produtividade e qualidade (Grupo 1), em contraste com perfis compatíveis com restrição nutricional (Grupo 2) ou com excesso de N e intensificação de respostas fisiológicas compensatórias (Grupo 3), sem retorno proporcional em produtividade.

Nesse contexto, o ajuste quadrático observado para as variáveis produtivas em função do N (Figura 20) sugere que o incremento do suprimento nitrogenado amplia o desempenho até um limiar, a partir do qual se intensificam limitações associadas ao desbalanço fonte–dreno e ao maior custo metabólico. Essa interpretação se harmoniza com a composição dos clusters, uma vez que o Grupo 1 concentra combinações intermediárias de N com maior associação às variáveis produtivas, enquanto o Grupo 3, representando o suprimento elevado de N, é compatível com um cenário de maior estímulo vegetativo sem conversão proporcional em rendimento.

Esse padrão é consistente com alterações na partição de assimilados sob suprimento elevado de N, com maior direcionamento de carbono para crescimento vegetativo e redução relativa do aporte ao enchimento do fruto (Oliveira *et al.*, 2015a; Bonomo *et al.*, 2020). Esse

desbalanço nutricional demonstra efeito no fruto (Figura 24t, Figura 24x.), em que frutos menores são acompanhados por coroas mais desenvolvidas causando prejuízos ao produtor devido a baixa aceitabilidade comercial desse padrão.

O incremento de massa do fruto com coroa e produtividade sob maior suprimento de K_2O (Figura 20a; Figura 20b) é interpretado como indicativo de que, nas condições do estudo, 480 kg ha^{-1} de K_2O atuou como suprimento adequado para sustentar enchimento e uniformidade dos frutos, em vez de representar excesso. Essa leitura é coerente com a distribuição dos tratamentos no Grupo 1 (Figura 23a), que reúne combinações de N/K associadas aos maiores níveis de produtividade e atributos de qualidade. Em consonância, trabalhos indicam que relações adequadas entre N e K favorecem rendimento e qualidade comercial, especialmente quando a razão K/N se aproxima de faixas consideradas favoráveis ao desempenho do abacaxi (Rodrigues *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015a; Djido *et al.*, 2021).

Entre os atributos de qualidade, a estabilidade do pH frente ao manejo de N e K_2O (Figura 21a) sugere manutenção do padrão de acidez ativa do fruto, com média de 4,16, compatível com intervalos relatados em outros estudos com abacaxi (Oliveira *et al.*, 2015b; Cunha *et al.*, 2021). Esse pH relativamente baixo é desejável no pós-colheita por restringir microrganismos patogênicos (Santos; Coelho; Carreiro, 2008) e se relaciona ao avanço da maturação e ao ponto de colheita (Dantas *et al.*, 2016), tendência que pode se manter mais uniforme quando a indução floral sincroniza o ciclo e a maturação (Carvalho *et al.*, 2005).

Por outro lado, a redução da acidez titulável com o incremento de N (Figura 21b) indica alteração do balanço de ácidos orgânicos do fruto, compatível com mudanças na relação C/N e com modulações do metabolismo do ácido cítrico, seja por redução de síntese ou intensificação do catabolismo durante o desenvolvimento do fruto (Etienne *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2015b). A interação entre N e K_2O sobre os sólidos solúveis (Figura 21c) reflete a centralidade do K na regulação do metabolismo de carboidratos e no transporte de açúcares ao dreno reprodutivo.

Assim, quando o suprimento de K_2O é adequado, o aumento de N tende a favorecer o acúmulo de solutos até uma faixa ótima, sugerindo melhor equilíbrio K:N para essa variável e posicionamento dos frutos em patamares mais elevados de SS (Cunha *et al.*, 2021). O incremento do SS/AT em resposta ao N (Figura 21d) e sob a maior dose de K_2O reforça o papel integrado de N e K na determinação do equilíbrio SS/AT, um atributo diretamente associado à aceitação comercial. Para a cultivar ‘Pérola’, uma relação SS/AT média de 22,17 é considerada adequada para consumo in natura (Berilli *et al.*, 2014; Rios *et al.*, 2018a).

Para vitamina C, doses altas de N sob 240 kg ha^{-1} de K_2O aumentam seu teor, mas sugerindo competição por fotoassimilados entre crescimento vegetativo e enchimento do fruto

em baixo suporte de potássio. Já com 480 kg ha^{-1} de K_2O , o N não afeta a vitamina C, indicando estabilidade metabólica e adequada alocação de carbono ao fruto devido ao papel do K no transporte de assimilados e metabolismo redox (Cao *et al.*, 2025; Fañanás-Pueyo *et al.*, 2025).

A resposta do teor de proteínas do fruto ao N (Fig. 17b), com ajuste quadrático, indica aumento até uma faixa ótima e redução sob doses mais elevadas. Esse padrão é compatível com a centralidade do N na biossíntese de aminoácidos e proteínas e com sua assimilação via rota GS/GOGAT, gerando glutamina e glutamato que sustentam a formação de compostos nitrogenados exportáveis a drenos, incluindo o fruto (Fortunato *et al.*, 2023). A queda sob excesso de N sugere limitação fisiológica na conversão do N disponível em proteína do fruto, plausivelmente associada a restrições de carbono e desbalanço na partição de assimilados, com maior direcionamento ao crescimento vegetativo (Shakeel *et al.*, 2021), interpretação coerente com o fenótipo associado ao Grupo 3.

Por fim, a resposta dos açúcares totais ao N (Figura 22c), também de natureza quadrática, é consistente com um balanço entre assimilação de carbono, respiração e partição de carboidratos ao dreno reprodutivo. Em quantidade adequadas, o suprimento de N tende a ampliar a capacidade assimilatória e favorecer o acúmulo de açúcares no fruto; sob excesso, entretanto, a intensificação do crescimento vegetativo aumenta a demanda competitiva por carboidratos, reduzindo a disponibilidade para acúmulo no fruto (Bassi; Menossi; Mattiello, 2018; Rossouw *et al.*, 2024).

Em síntese, a integração entre padrões univariados e multivariados indica que o Grupo 1 representa combinações de N e K com maior coerência entre crescimento, enchimento do fruto e melhoria coordenada de atributos de qualidade; o Grupo 2 reflete restrição nutricional e menor desenvolvimento da planta; e o Grupo 3 caracteriza excesso de N com desbalanceamento fonte–dreno, intensificação vegetativa com ausência de retorno proporcional em produtividade e qualidade.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A combinação de 355 kg ha⁻¹ de N e 480 kg ha⁻¹ de K₂O proporciona o melhor desempenho agrônômico, com aumento da produtividade e aprimoramento dos atributos de qualidade dos frutos, além de favorecer o equilíbrio fisiológico das plantas em relação às condições de deficiência ou excesso de N.

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos voltados à validação das doses e do esquema de parcelamento da adubação aplicados ao abacaxizeiro ‘Pérola’, considerando as particularidades dos solos arenosos predominantes na região, caracterizados pela baixa capacidade de retenção de nutrientes e alta suscetibilidade a perdas por lixiviação. Além disso, é relevante a inclusão de avaliações econômicas que permitam estabelecer a relação custo-benefício das práticas de adubação, bem como de indicadores ambientais capazes de refletir o impacto do uso de fertilizantes nitrogenados e potássicos sobre o sistema produtivo.

Adicionalmente, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem abordagens direcionadas ao consumidor, visando compreender de forma mais direta como as combinações de N e K₂O influenciam atributos percebidos no consumo, como sabor, doçura, acidez, aroma, textura e aceitação sensorial, bem como parâmetros ligados ao valor nutricional do fruto, como vitamina C e açúcares. A integração desses parâmetros poderá fornecer subsídios técnicos que ajudarão a melhorar a recomendação de adubação para o abacaxizeiro ‘Pérola’, tornando o manejo mais eficiente e sustentável, contribuindo com a competitividade da cultura ao reforçar seu papel como alternativa produtiva nos sistemas agrícolas da região Meio-Norte do Piauí.

REFERÊNCIAS

- AHANGER, M. A.; AGARWAL, R. M.; TOMAR, N. S.; SHRIVASTAVA, M. Potassium induces positive changes in nitrogen metabolism and antioxidant system of oat (*Avena sativa* L. cultivar Kent). **Journal of Plant Interactions**, v. 10, n. 1, p. 211-223, 2015.
- ANJUM, N. A.; SHARMA, P.; GILL, S. S.; HASANUZZAMAN, M.; KHAN, E. A.; KACHHAP, K.; MOHAMED, A. A.; THANGAVEL, P.; DEVI, G. D.; VASUDHEVAN, P.; SOFO, A.; KHAN, N. A.; MISRA, A. N.; LUKATKIN, A. S.; SINGH, H. P.; PEREIRA, E.; TUTEJA, N. Catalase and ascorbate peroxidase-representative H₂O₂-detoxifying heme enzymes in plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 19, p. 19002-19029, 2016.
- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v. 24, n. 1, p. 1-15, 1949.
- BARKER, D. L.; ARANTES, S. D.; SCHMILDT, E. R.; VENTURA, J. A.; ARANTES, L. D. O.; SILVA, J. F. D.; CERRI NETO, B.; BUFFON, S. B.; FONTES, P. S. F. Performance of “Vitória” pineapple in response to different types of shoots and ages of floral induction. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01598, 2020.
- BASSI, D.; MENOSSE, M.; MATTIELLO, L. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 2327, 2018.
- BELAL, H. E. E.; ABDELPARY, M. A. M.; DESOKY, E.-S. M.; ALI, E. F.; AL KASHGRY, N. A. T.; RADY, M. M.; SEMIDA, W. M.; MAHMOUD, A. E. M.; SAYED, A. A. S. Effect of eco-friendly application of bee honey solution on yield, physio-chemical, antioxidants, and enzyme gene expressions in excessive nitrogen-stressed common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. **Plants**, v. 12, n. 19, p. 3435, 2023.
- BERILLI, S. D. S.; FREITAS, S. D. J.; SANTOS, P. C. D.; OLIVEIRA, J. G. D.; CAETANO, L. C. S. Avaliação da qualidade de frutos de quatro genótipos de abacaxi para consumo in natura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 2, p. 503-508, 2014.
- BONOMO, R.; ZUCOLOTO, M.; SOUZA, J. M. D.; MAGALHÃES, A. M. D. P.; DE SOUZA BALDOTTO, P. H.; CAMPANHARO, A. Production and quality of “Pérola” pineapple under fertigation. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, p. 109, 2020.
- BORGES, A. L. (org.). **Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. 303 p.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.
- CAETANO, L. C. S.; VENTURA, J. A.; COSTA, A. D. F. S. D.; GUARÇONI, R. C. Efeito da adubação com nitrogênio, fósforo e potássio no desenvolvimento, na produção e na

qualidade de frutos do abacaxi “Vitória”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 3, p. 883-890, 2013.

CAMPOS, C. N. S.; TEIXEIRA, G. C. M.; PRADO, R. D. M.; CAIONE, G.; SILVA JÚNIOR, G. B.; DAVID, C. H. O. D.; SALES, A. C.; ROQUE, C. G.; TEODORO, P. E. Macronutrient deficiency in cucumber plants: impacts in nutrition, growth and symptoms. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 17, p. 2609-2626, 2021.

CAO, W.; SUN, H.; SHAO, C.; WANG, Y.; ZHU, J.; LONG, H.; GENG, X.; ZHANG, Y. Progress in the study of plant nitrogen and potassium nutrition and their interaction mechanisms. **Horticulturae**, v. 11, n. 8, p. 930, 2025.

CAO, Y.; WILLIAMS, D. D.; WILLIAMS, N. E. Data transformation and standardization in the multivariate analysis of river water quality. **Ecological Applications**, v. 9, n. 2, p. 669-677, 1999.

CARRASCO-CUELLO, F.; JENÉ, L.; DOLCET-SANJUAN, R.; QUÍÑONES, A.; RUFAT, J.; TORRES, E. Differential response to calcium-labelled (^{44}Ca) uptake and allocation in two peach rootstocks in relation to transpiration under in vitro conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 326, p. 112718, 2024.

CARVALHO, S. L. C. D.; NEVES, C. S. V. J.; BÜRKLE, R.; MARUR, C. J. Épocas de indução floral e soma térmica do período do florescimento à colheita de abacaxi “Smooth Cayenne”. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 27, n. 3, p. 430-433, 2005.

CHEN, L. H.; XU, M.; CHENG, Z.; YANG, L. T. Effects of nitrogen deficiency on the photosynthesis, chlorophyll a fluorescence, antioxidant system, and sulfur compounds in *Oryza sativa*. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 19, p. 10409, 2024.

CHEN, S.; ZHANG, W.; GE, X.; ZHENG, X.; ZHOU, X.; DING, H.; ZHANG, A. Response of plant and soil N, P, and N:P stoichiometry to N addition in China: A meta-analysis. **Plants**, v. 12, n. 11, p. 2104, 2023.

CHENG, Y.; BARTHOLOMEW, D.; QIN, Y. Biology of the pineapple plant. In: MING, R. (org.). **Genetics and Genomics of Pineapple**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 27-40.

CISSE, A.; ZHAO, X.; FU, W.; KIM, R. E. R.; CHEN, T.; TAO, L.; FENG, B. Non-Photochemical quenching involved in the regulation of photosynthesis of rice leaves under high nitrogen conditions. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 6, p. 2115, 2020.

CORPAS, F. J.; GONZÁLEZ-GORDO, S.; PALMA, J. M. Ascorbate peroxidase in fruits and modulation of its activity by reactive species. **Journal of Experimental Botany**, v. 75, n. 9, p. 2716-2732, 2024.

COSKUN, D.; BRITTO, D. T.; KRONZUCKER, H. J. The nitrogen-potassium intersection: membranes, metabolism, and mechanism. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, n. 10, p. 2029-2041, 2017.

COUTO, T. R.; SILVA, J. R.; OLIVEIRA MORAES, C. R.; RIBEIRO, M. S.; NETTO, A. T.; CARVALHO, V. S.; CAMPOSTRINI, E. Photosynthetic metabolism and growth of pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) cultivated ex vitro. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 28, n. 3, p. 333-339, 2016.

CUN, Z.; WU, H.-M.; ZHANG, J.-Y.; SHUANG, S.-P.; HONG, J.; CHEN, J.-W. Responses of linear and cyclic electron flow to nitrogen stress in an N-sensitive species *Panax notoginseng*. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 796931, 2022.

CUNHA, J. M.; FREITAS, M. S. M.; CARVALHO, A. J. C.; CAETANO, L. C. S.; VIEIRA, M. E.; PEÇANHA, D. A.; LIMA, T. C.; JESUS, A. C.; PINTO, L. P. Pineapple yield and fruit quality in response to potassium fertilization. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 6, p. 865-874, 2021.

DANTAS, A. L.; SILVA, S. D. M.; DANTAS, R. L.; SOUSA, A. S. B. D.; SCHUNEMANN, A. P. P. Desenvolvimento, fisiologia da maturação e indicadores do ponto de colheita de frutos da umbugeleira (*Spondias* sp.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 1, p. 33-42, 2016.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214-219, 1980.

DJIDO, U.; FASSINOU HOTEgni, N. V.; LOMMEN, W. J. M.; HOUNHOUIGAN, J. D.; ACHIGAN-DAKO, E. G.; STRUIK, P. C. Effect of planting density and K₂O:N ratio on the yield, external quality, and traders' perceived shelf life of pineapple fruits in Benin. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 627808, 2021.

DU, Q.; ZHAO, X.; XIA, L.; JIANG, C.; WANG, X.; HAN, Y.; WANG, J.; YU, H. Effects of potassium deficiency on photosynthesis, chloroplast ultrastructure, ROS, and antioxidant activities in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 395-406, 2019.

EL-MAGEED, T. A. A.; MEKDDAD, A. A. A.; RADY, M. O. A.; ABDELBAKY, A. S.; SAUDY, H. S.; SHAABAN, A. Physio-biochemical and agronomic changes of two sugar beet cultivars grown in saline soil as influenced by potassium fertilizer. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3636-3654, 2022.

EPSKAMP, S.; CRAMER, A. O. J.; WALDORP, L. J.; SCHMITTMANN, V. D.; BORSBOOM, D. Qgraph: network visualizations of relationships in psychometric data. **Journal of Statistical Software**, v. 48, n. 4, p. 1-18, 2012.

ETIENNE, A.; GÉNARD, M.; LOBIT, P.; MBEGUIÉ-A-MBÉGUIÉ, D.; BUGAUD, C. What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 6, p. 1451-1469, 2013.

EVANS, J. R.; CLARKE, V. C. The nitrogen cost of photosynthesis. **Journal of Experimental Botany**, v. 70, n. 1, p. 7-15, 2019.

FAÑANÁS-PUEYO, I.; CARRERA-CASTAÑO, G.; PERNAS, M.; OÑATE-SÁNCHEZ, L. Signalling and regulation of plant development by carbon/nitrogen balance. **Physiologia Plantarum**, v. 177, n. 2, p. e70228, 2025.

FAO. FAOSTAT: Crops and livestock products. FAO, 2026. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 04 mar. 2026.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952-2958, 2014.

FORTUNATO, S.; NIGRO, D.; LASORELLA, C.; MARCOTULI, I.; GADALETA, A.; DE PINTO, M. C. The role of Glutamine Synthetase (GS) and Glutamate Synthase (GOGAT) in the improvement of nitrogen use efficiency in cereals. **Biomolecules**, v. 13, n. 12, p. 1771, 2023.

GARCIA, A.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSOLEM, C. A.; BOSSOLANI, J. W.; NASCIMENTO, C. A. C.; MCCRAY, J. M.; DOS REIS, A. R.; CAKMAK, I. Potassium-magnesium imbalance causes detrimental effects on growth, starch allocation and Rubisco activity in sugarcane plants. **Plant and Soil**, v. 472, n. 1-2, p. 225-238, 2022.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

HAIR JUNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 682 p.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.

HAYES, M. Measuring protein content in food: an overview of methods. **Foods**, v. 9, n. 10, p. 1340, 2020.

IBGE. PAM – Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 8 abr. 2024.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 1. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

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

JOHNSON, R.; VISHWAKARMA, K.; HOSSEN, M. S.; KUMAR, V.; SHACKIRA, A. M.; PUTHUR, J. T.; ABDI, G.; SARRAF, M.; HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 172, p. 56-69, 2022.

- KAMEOKA, T.; OKAYASU, T.; KIKURAKU, K.; OGAWA, T.; SAWA, Y.; YAMAMOTO, H.; ISHIKAWA, T.; MARUTA, T. Cooperation of chloroplast ascorbate peroxidases and proton gradient regulation 5 is critical for protecting *Arabidopsis* plants from photo-oxidative stress. **The Plant Journal**, v. 107, n. 3, p. 876-892, 2021.
- KÖLLN, O. T.; GAVA, G. J. D. C.; MARIANO, E.; CANTARELLA, H.; PANUTTI, L. E.; URIBE, R. M.; ARLANCH, A. B.; PALUDETTO, A.; PEREIRA, C. D.; TRIVELIN, P. C. O. Biomass accumulation and growth curve in sugarcane fertigated with nitrogen doses. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 244-253, 2023.
- KOVÁČIK, J.; KLEJDUS, B.; BABULA, P.; JAROŠOVÁ, M. Variation of antioxidants and secondary metabolites in nitrogen-deficient barley plants. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, n. 3-4, p. 260-268, 2014.
- KUHN, M. Desirability: function optimization and ranking via desirability functions. CRAN, 2016.
- KUMAR, S.; KUMAR, S.; MOHAPATRA, T. Interaction between macro and micronutrients in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 665583, 2021.
- LE, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, 2008.
- LEE, B. R.; KIM, K. Y.; JUNG, W. J.; AVICE, J. C.; OURRY, A.; KIM, T. H. Peroxidases and lignification in relation to the intensity of water-deficit stress in white clover (*Trifolium repens* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 6, p. 1271-1279, 2007.
- LI, H.; CHEN, Z.; ZHOU, T.; LIU, Y.; RAZA, S.; ZHOU, J. Effects of high potassium and low temperature on the growth and magnesium nutrition of different tomato cultivars. **HortScience**, v. 53, n. 5, p. 710-714, 2018.
- LI, Q.; GAO, Y.; YANG, A. Sulfur homeostasis in plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 23, p. 8926, 2020.
- LI, Z.; HU, M.; LIU, T.; TANG, Y.; LIU, R.; PENG, Z.; WANG, C.; PENG, Z.; WANG, Z.; CHEN, Z.; YANG, Z.; SUN, Y.; MA, J. Effects of N-K management strategies on nutrient uptake efficiency, lodging resistance, and yield in machine-transplanted rice. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1658245, 2025.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in Enzymology**. Elsevier, 1987. p. 350-382.
- LIMA, R. P.; SOUSA, A. S. B.; DANTAS, R. L.; DANTAS, A. L.; MENDONÇA, R. M. N.; SOUZA, A. P.; SILVA, M. C. A.; SANTOS, E. F. S.; SILVA, S. D. M. Nitrogen and potassium balance as key regulators of antioxidant metabolism in pineapple fruit. **Journal of Plant Nutrition**, v. 48, n. 16, p. 2911-2926, 2025.
- LOBO, M. G.; PAULL, R. E. (org.). **Handbook of pineapple technology: production, postharvest science, processing and nutrition**. Wiley, 2017. 270 p.

MISHRA, N.; JIANG, C.; CHEN, L.; PAUL, A.; CHATTERJEE, A.; SHEN, G. Achieving abiotic stress tolerance in plants through antioxidative defense mechanisms. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1110622, 2023.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

NIECHAYEV, N. A.; PEREIRA, P. N.; CUSHMAN, J. C. Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). **Current Opinion in Plant Biology**, v. 49, p. 74-85, 2019.

OLESZKIEWICZ, T.; KRUCZEK, M.; BARANSKI, R. Repression of carotenoid accumulation by nitrogen and NH_4^+ supply in carrot callus cells in vitro. **Plants**, v. 10, n. 9, p. 1813, 2021.

OLIVEIRA, A. M. G.; NATALE, W.; ROSA, R. C. C.; JUNGHANS, D. T. Adubação N-K no abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ – II efeito no solo, na nutrição da planta e na produção. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 3, p. 764-772, 2015a.

OLIVEIRA, A. M. G.; PEREIRA, M. E. C.; NATALE, W.; NUNES, W. S.; LEDO, C. A. D. S. Qualidade do abacaxizeiro ‘BRS Imperial’ em função de doses de N-K. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, n. 2, p. 497-506, 2015b.

PANDEY, S.; FARTYAL, D.; AGARWAL, A.; SHUKLA, T.; JAMES, D.; KAUL, T.; NEGI, Y. K.; ARORA, S.; REDDY, M. K. Abiotic stress tolerance in plants: myriad roles of ascorbate peroxidase. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 581, 2017.

PAULL, R. E.; URUU, G.; CHEN, N. J. Rapid field assay for pineapple fruit acidity. **HortTechnology**, v. 30, n. 5, p. 593-596, 2020.

PERALTA-SÁNCHEZ, M. G.; GÓMEZ-MERINO, F. C.; TEJEDA-SARTORIUS, O.; TREJO-TÉLLEZ, L. I. Nitrogen nutrition differentially affects concentrations of photosynthetic pigments and antioxidant compounds in Mexican marigold (*Tagetes erecta* L.). **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 517, 2023.

POLLE, A.; OTTER, T.; SEIFERT, F. Apoplastic peroxidases and lignification in needles of Norway spruce (*Picea abies* L.). **Plant Physiology**, v. 106, n. 1, p. 53-60, 1994.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2020.

QU, R.; HAN, G. Effects of high Ca and Mg stress on plant water use efficiency in a Karst ecosystem. **PeerJ**, v. 10, p. e13925, 2022.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R foundation for statistical computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

RAGEL, P.; RADDATZ, N.; LEIDI, E. O.; QUINTERO, F. J.; PARDO, J. M. Regulation of K^+ nutrition in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 281, 2019.

RAJPUT, V. D.; HARISH; SINGH, R. K.; VERMA, K. K.; SHARMA, L.; QUIROZ-FIGUEROA, F. R.; MEENA, M.; GOUR, V. S.; MINKINA, T.; SUSHKOVA, S.; MANDZHIEVA, S. Recent developments in enzymatic antioxidant defence mechanism in plants with special reference to abiotic stress. **Biology**, v. 10, n. 4, p. 267, 2021.

REINHARDT, D. H. R. C.; BARTHOLOMEW, D. P.; SOUZA, F. V. D.; CARVALHO, A. C. P. P.; PÁDUA, T. R. P.; JUNGHANS, D. T.; MATOS, A. P. D. Advances in pineapple plant propagation. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 6, 2018.

RIBEIRO, A. M. A. S.; BONOMO, R.; ZUCOLOTO, M.; SILVA, F. O. R.; BARROCA, M. V.; NASCIMENTO, A. D. L.; MAGALHÃES, A. M. P.; CAMPANHARO, A.; OLIOSI, G.; CIARNOSCHI, L. D. Potassium and nitrogen fertigation frequency on pineapple yield and fruit quality. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 6, p. 416, 2019.

RIOS, E. S. C.; MENDONÇA, R. M. N.; CARDOSO, E. A.; COSTA, J. P.; SILVA, S. M. Quality of 'Imperial' pineapple infructescence in function of nitrogen and potassium fertilization. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 1, p. 1-8, 2018a.

RIOS, E. S. C.; MENDONÇA, R. M. N.; FERNANDES, L. F.; FIGUEREDO, L. F.; CARDOSO, E. A.; SOUZA, A. P. Growth of leaf D and productivity of 'Imperial' pineapple as a function of nitrogen and potassium fertilization. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 2, p. 1-9, 2018b.

RODRIGUES, A. A.; MENDONÇA, R. M. N.; SILVA, A. P. D.; SILVA, S. D. M. Nutrição mineral e produção de abacaxizeiro "Pérola", em função das relações K/N na adubação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 2, p. 625-633, 2013.

RODRIGUES, J. B. B.; SILVA, A. P.; ROZANE, D. E.; NATALE, W.; SILVA, S. D. M. Leaf reference values for 'Pérola' pineapple quality using compositional nutrient diagnosis. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 20, p. 3066-3079, 2022.

ROSSOUW, G. C.; ORR, R.; BENNETT, D.; BALLY, I. S. E. The roles of non-structural carbohydrates in fruiting: a review focusing on mango (*Mangifera indica*). **Functional Plant Biology**, v. 51, n. 4, p. FP23195, 2024.

RU, C.; WANG, K.; HU, X.; CHEN, D.; WANG, W.; YANG, H. Nitrogen modulates the effects of heat, drought, and combined stresses on photosynthesis, antioxidant capacity, cell osmoregulation, and grain yield in winter wheat. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 3, p. 1681-1703, 2023.

RUIZ, K. C.; SÁNCHEZ, M. I. G.; RODRÍGUEZ, L. E. M. Accumulation and distribution of calcium, magnesium, and sulfur in potato (*Solanum tuberosum* Group Andigenum) cultivars Diacol Capiro and Pastusa Suprema. **Agronomía Colombiana**, v. 43, n. 1, p. e117826, 2025.

SANTANA, L. L. D. A.; REINHARDT, D. H.; MEDINA, V. M.; LEDO, C. A. D. S.; CALDAS, R. C.; PEIXOTO, C. P. Efeitos de modos de aplicação e concentrações de etefon na coloração da casa e outros atributos de qualidade do abacaxi "Pérola". **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 2, p. 212-216, 2004.

- SANTOS, C. A. D. A.; COELHO, A. F. S.; CARREIRO, S. C. Avaliação microbiológica de polpas de frutas congeladas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 4, p. 913–915, 2008.
- SARKAR, T.; SALAUDDIN, M.; HAZRA, S. K.; CHAKRABORTY, R. The impact of raw and differently dried pineapple (*Ananas comosus*) fortification on the vitamins, organic acid and carotene profile of dairy rasgulla (sweetened cheese ball). **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05233, 2020.
- SCHLEUSS, P. M.; WIDDIG, M.; HEINTZ-BUSCHART, A.; KIRKMAN, K.; SPOHN, M. Interactions of nitrogen and phosphorus cycling promote P acquisition and explain synergistic plant-growth responses. **Ecology**, v. 101, n. 5, p. e03003, 2020.
- SERAG, A.; EL-SAMET, R.; SEADH, A. Impacts of sulfur fertilization as soil addition, potassium foliar application and their interactions on rice plant under saline condition. **Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering**, v. 13, n. 10, p. 347-354, 2022.
- SHAKEEL, A.; KHAN, A. A.; ALHARBY, H. F.; BAMAGOOS, A. A.; ALABDALLAH, N. M.; HAKEEM, K. R. Optimizing nitrogen application in root vegetables from their growth, biochemical and antioxidant response to urea fertilizer. **Agriculture**, v. 11, n. 8, p. 704, 2021.
- SHAMS, M.; POKORA, W.; KHADIVI, A.; AKSMANN, A. Superoxide dismutase in *Arabidopsis* and *Chlamydomonas*: diversity, localization, regulation, and role. **Plant and Soil**, v. 503, n. 1-2, p. 751-771, 2024.
- SHARMA, A.; KUMAR, V.; SHAHZAD, B.; RAMAKRISHNAN, M.; SINGH SIDHU, G. P.; BALI, A. S.; HANDA, N.; KAPOOR, D.; YADAV, P.; KHANNA, K.; BAKSHI, P.; REHMAN, A.; KOHLI, S. K.; KHAN, E. A.; PARIHAR, R. D.; YUAN, H.; THUKRAL, A. K.; BHARDWAJ, R.; ZHENG, B. Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 39, n. 2, p. 509-531, 2020.
- SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 634 p.
- SILVA, F. O. R.; ZUCOLOTO, M.; RIBEIRO, A. M. A. S.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; NASCIMENTO, M. L. U. Root development and productivity of ‘Pérola’ pineapple as a function of fertigation management. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 43, n. 2, p. e-082, 2021.
- SIRIWARDANA, C. L.; CARLTON, A. S.; MONCAYO, T. L.; O’BIER, E. A.; BARTLEY, L. E. An introduction to network analysis in plant biology. **Plant Direct**, v. 9, n. 10, p. e70114, 2025.
- SONG, G.; WANG, Q. Developing hyperspectral indices for assessing seasonal variations in the ratio of chlorophyll to carotenoid in deciduous forests. **Remote Sensing**, v. 14, n. 6, p. 1324, 2022.
- SRIVASTAVA, A. K.; SHANKAR, A.; NALINI CHANDRAN, A. K.; SHARMA, M.; JUNG, K.-H.; SUPRASANNA, P.; PANDEY, G. K. Emerging concepts of potassium homeostasis in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 2, p. 608-619, 2020.

TAIZ, L.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 7. ed. Porto Alegre, RS: Artmed, 2024. 856 p.

TANTRAY, A. Y.; BASHIR, S. S.; AHMAD, A. Low nitrogen stress regulates chlorophyll fluorescence in coordination with photosynthesis and Rubisco efficiency of rice. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 26, n. 1, p. 83-94, 2020.

TEIXEIRA, L. A. J.; SPIRONELLO, A.; FURLANI, P. R.; SIGRIST, J. M. M. Parcelamento da adubação NPK em abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 1, p. 219-224, 2002.

TEWARI, R. K.; KUMAR, P.; SHARMA, P. N. Oxidative stress and antioxidant responses in young leaves of mulberry plants grown under nitrogen, phosphorus or potassium deficiency. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 49, n. 3, p. 313-322, 2007.

THORISINGAM, Y.; MUSTAFA, M. S. Augmented approach to desirability function based on principal component analysis. **International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development**, v. 11, n. 2, p. 526-533, 2022.

URBANEK, H.; KUZNIAK-GEBAROWSKA, E. Elicitation of defence responses in bean leaves by *Botrytis cinerea* polygalacturonase. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 13, n. 1, p. 43-50, 1991.

VÁZQUEZ, E.; BORER, E. T.; BUGALHO, M. N.; CALDEIRA, M. C.; MCCULLEY, R. L.; RISCH, A. C.; SEABLOOM, E. W.; WHEELER, G. R.; SPOHN, M. The synergistic response of primary production in grasslands to combined nitrogen and phosphorus addition is caused by increased nutrient uptake and retention. **Plant and Soil**, v. 490, n. 1-2, p. 371-385, 2023.

VIANA, E. D. S.; REIS, R. C.; ROSA, R. C. C.; PÁDUA, T. R. P. D.; MATOS, A. P. D. Quality and sensory acceptance of 'Pérola' pineapple grown in soil with application of organic fertilizer. **Ciência Rural**, v. 49, n. 7, p. e20170631, 2019.

VOLF, M. R.; BATISTA-SILVA, W.; SILVÉRIO, A. D.; DOS SANTOS, L. G.; TIRITAN, C. S. Effect of potassium fertilization in sandy soil on the content of essential nutrients in soybean leaves. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 67, n. 1, p. 99-106, 2022.

WANG, J.; GENG, Y.; ZHANG, J.; LI, L.; GUO, F.; YANG, S.; ZOU, J.; WAN, S. Increasing calcium and decreasing nitrogen fertilizers improves peanut growth and productivity by enhancing photosynthetic efficiency and nutrient accumulation in acidic red soil. **Agronomy**, v. 13, n. 7, p. 1924, 2023.

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. The utilization and roles of nitrogen in plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, 2024.

WANG, Y.; CHEN, Y.; WU, W. Potassium and phosphorus transport and signaling in plants. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 34-52, 2021.

WDOWIAK, A.; PODGÓRSKA, A.; SZAL, B. Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 46, n. 12, p. 108, 2024.

WEGNER, L. H.; POTTOSIN, I.; DREYER, I.; SHABALA, S. Potassium homeostasis and signalling: from the whole plant to the subcellular level. **Quantitative Plant Biology**, v. 6, p. e13, 2025.

WICKHAM, H. **Ggplot2: elegant graphics for data analysis**. New York: Springer-Verlag, 2016.

XIE, K.; CAKMAK, I.; WANG, S.; ZHANG, F.; GUO, S. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants. **The Crop Journal**, v. 9, n. 2, p. 249-256, 2021.

XU, X.; DU, X.; WANG, F.; SHA, J.; CHEN, Q.; TIAN, G.; ZHU, Z.; GE, S.; JIANG, Y. Effects of potassium levels on plant growth, accumulation and distribution of carbon, and nitrate metabolism in apple dwarf rootstock seedlings. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 904, 2020.

YANG, Y.; HUANG, Z.; WU, Y.; WU, W.; LYU, L.; LI, W. Effects of nitrogen application level on the physiological characteristics, yield and fruit quality of blackberry. **Scientia Horticulturae**, v. 313, p. 111915, 2023.

YU, Z. C.; LIN, W.; HE, W.; YAN, G. Z.; ZHENG, X. T.; LUO, Y. N.; ZHU, H.; PENG, C. L. Dynamic changes of the contents of photoprotective substances and photosynthetic maturation during leaf development of evergreen tree species in subtropical forests. **Tree Physiology**, v. 43, n. 6, p. 965-978, 2023.

YUE, F.; ZHANG, J.; XU, J.; NIU, T.; LÜ, X.; LIU, M. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, p. 963318, 2022.