



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA
DOUTORADO EM FITOTECNIA

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

**ACÚMULO TÉRMICO NA MARCHA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E
PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE MILHETO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE NPK**

MOSSORÓ – RN
2025

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

**ACÚMULO TÉRMICO NA MARCHA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E
PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE MILHETO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE NPK**

Tese apresentada ao Doutorado em Fitotecnia
do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Doutor em Agronomia/Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Nutrição, Irrigação e
Salinidade

Orientador: José Francismar de Medeiros,
Prof. Dr.

MOSSORÓ – RN
2025

O48a Oliveira, Flavio Sarmento.
Acúmulo térmico na marcha de absorção de
nutrientes e produção de cultivares de milho sob
diferentes níveis de NPK / Flavio Sarmento
Oliveira. - 2025.
75 f. : il.

Orientador: José Francismar Medeiros.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Fitotecnia, 2025.

1. Pennisetum glaucum. 2. exigência térmica.
3. biomassa acumulada. 4. eficiência
nutricional. I. Medeiros, José Francismar,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

**ACÚMULO TÉRMICO NA MARCHA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E
PRODUÇÃO DE CULTIVARES DE MILHETO SOB DIFERENTES NÍVEIS DE NPK**

Tese apresentada ao Doutorado em Fitotecnia
do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia
da Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Doutor em Agronomia/Fitotecnia.

Defendida em: 27 / 05 / 2025

BANCA EXAMINADORA

José Francismar de Medeiros, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Flávio Pereira da Mota Silveira, Dr. (UFRN)
Membro Examinador

Francisco Vaniés da Silva Sá, Prof. Dr. (UEPB)
Membro Examinador

Hamurábi Anízio Lins, Prof. Dr. (UEFS)
Membro Examinador

Josinaldo Lopes Araujo Rocha, Prof. Dr. (UFCG)
Membro Examinador

Ao meu avô materno, Antônio Sarmiento Rodrigues (*In Memoriam*) e aos meus avós paternos, João Domingos de Oliveira e Maria Lourete de Oliveira (*In Memoriam*), que sempre lutaram para proporcionar à família educação e uma vida digna e honrada.

Aos meus pais, Francisco João de Oliveira e Maria Euza Sarmiento de Oliveira, e à minha esposa, Brenda Barbosa da Silva, por todo o amor e apoio indispensável nesta trajetória de lutas e vitórias da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A DEUS agradeço pelo presente da vida, pela proteção física e espiritual, força e sabedoria nos momentos mais difíceis e pelas alegrias e vitórias que, por seu grandioso poder que atua em nós, é capaz de realizar infinitamente mais do que poderíamos pedir ou imaginar;

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Ufersa), por meio do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia (PPGFITO), pela oportunidade de realização do curso de Doutorado;

Ao professor e orientador, Dr. José Francismar de Medeiros, pela disponibilidade, orientação e ensinamentos ao longo dos últimos anos;

À empresa Agro Norte Pesquisa e Sementes LTDA pela doação e envio das sementes das cultivares de milho desta pesquisa;

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), *campus* Apodi, pela concessão de uso das instalações de campo e laboratório para realização desta pesquisa e pela oportunidade de realização do Estágio de Docência;

À Coordenação do PPGFITO, na pessoa da Profa. Dra. Ioná Santos Araújo Holanda e do Prof. Dr. Aurélio Paes Barros Júnior;

Ao meu pai, Francisco João de Oliveira, e à minha mãe, Maria Euza Sarmiento de Oliveira, por todo o amor e carinho que dedicaram a mim em toda a minha vida. Palavras nunca serão o suficiente para agradecer todos os esforços, lutas e privações que tiveram que suportar para proporcionar educação, vida digna e as condições que me permitiram chegar tão longe;

À minha esposa, Brenda Barbosa da Silva, pelo imenso amor, incentivo, carinho e cumplicidade em todos esses anos. Obrigado pela compreensão, resiliência e fortaleza nos momentos de dor e angústia. Agradeço a Deus por tê-la na minha vida e partilharmos juntos as alegrias, conquistas, desafios e dificuldades nesta jornada;

Ao meu irmão, Dr. Fernando Sarmiento de Oliveira;

Ao corpo docente do PPGFITO pelos conhecimentos construídos ao longo do curso;

Aos examinadores da banca de avaliação, pela disponibilidade, colaboração e sugestões para melhoria do trabalho;

A todos aqueles que, muito embora não tenham seus nomes acima citados por lapso pontual de memória, não obstante contribuíram de forma direta e/ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

O estudo da marcha absorção de nutrientes e da produção de matéria seca é essencial para orientar estratégias de adubação, definindo as quantidades adequadas, os momentos ideais de aplicação e os níveis mínimos de reposição necessários para manter a fertilidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho produtivo, a marcha de absorção de macro e micronutrientes e o acúmulo de matéria seca (MS) na parte aérea de plantas de milheto granífero e forrageiro, em função dos estádios fenológicos e acúmulo térmico para diferentes níveis de adubação com NPK. A pesquisa foi desenvolvida em condições de campo, em uma área experimental do Instituto Federal do Rio Grande do Norte, *Campus* Apodi. Foi utilizado o delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo quatro níveis de adubação NPK (0, 50, 100 e 150% da recomendação de adubação para a cultura do milheto) dispostas nas parcelas e, nas subparcelas, as épocas de coleta das plantas, considerando os nove estádios fenológicos da cultura do milheto. Para cada época de coleta, as plantas foram coletadas, separadas em folhas, caule e grãos e secas em estufa para a determinação da MS. Amostras dos tecidos vegetais secos de plantas fertilizadas com o nível de adubação de 150% foram utilizadas para determinações dos teores de nutrientes na MS das diferentes partes da planta. Foram avaliadas a produtividade de grãos e de MS e os teores de N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn e Zn na MS. Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F ($P < 0,05$) e às análises de regressão. O acúmulo máximo de nitrogênio, fósforo e potássio ocorreu no início da fase de enchimento do grão. A parte aérea de plantas de milheto, cultivar ANm 05, acumulou maiores quantidades de MS, P, K, B, Cu, Fe e Mn do que a cultivar ANm 07. Plantas de milheto acumulam pequenas quantidades de micronutrientes durante a fase vegetativa. As maiores taxas de acúmulos de MS e nutrientes ocorrem entre o final da fase vegetativa e o início da fase de desenvolvimento da panícula. A produção máxima de grãos da cultivar ANm 05 foi de $4,49 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto o milheto ANm 07 produziu até $56,09 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa verde da parte aérea quando colhida na fase de enchimento de grãos. Plantas de milheto acumulam nutrientes em sua parte aérea na seguinte ordem decrescente: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$. As quantidades totais de nutrientes necessárias para produzir um Megrama de MS total de milheto são: 7,8 a 13,52 kg de N; 1,10 a 1,65 kg de P; 8,52 a 18,48 kg de K; 4,6 a 8,92 kg de Ca; 2,33 a 2,97 kg de Mg; 10,0 g de B; 7,0 g de Cu; 60,0 a 90,0 g de Fe; 30,0 a 50,0 g de Mn; 5,0 a 10,0 g de Zn.

Palavras-chave: *Pennisetum glaucum*; exigência térmica; biomassa acumulada; eficiência nutricional.

ABSTRACT

The study of nutrient uptake dynamics and dry matter production is essential for guiding fertilization strategies, determining appropriate application rates, optimal timing, and the minimum replacement levels needed to maintain soil fertility. The objective of this work was to evaluate the productive performance, the uptake dynamics of macro- and micronutrients, and the accumulation of dry matter (DM) in the aerial parts of grain and forage pearl millet plants, according to phenological stages and thermal accumulation under different NPK fertilization levels. The research was conducted under field conditions in an experimental area at the Federal Institute of Rio Grande do Norte, Apodi Campus. A randomized complete block design with four replicates was used, arranged in a split-plot scheme. Four NPK fertilization levels (0, 50, 100, and 150% of the recommended dose for pearl millet cultivation) were assigned to the main plots, and the plant sampling times, considering the nine phenological stages of pearl millet, were assigned to the subplots. At each sampling time, plants were collected, separated into leaves, stems, and grains, and dried in a greenhouse to determine DM. Samples of dried plant tissues from plants fertilized at the 150% NPK level were used to determine nutrient contents in the DM of the different plant parts. Grain yield, DM yield, and contents of N, P, K, Ca, Mg, B, Cu, Fe, Mn, and Zn in the DM were evaluated. Data were subjected to analysis of variance using the F-test ($P < 0.05$) and regression analyses. Maximum accumulation of nitrogen, phosphorus, and potassium occurred at the beginning of the grain-filling stage. The aerial parts of pearl millet plants of the ANm 05 cultivar accumulated higher amounts of DM, P, K, B, Cu, Fe, and Mn than those of cultivar ANm 07. Pearl millet plants accumulate small amounts of micronutrients during the vegetative stage. The highest rates of DM and nutrient accumulation occur between the end of the vegetative stage and the beginning of panicle development. Maximum grain yield of the ANm 05 cultivar was 4.49 Mg ha^{-1} , while ANm 07 produced up to 56.09 Mg ha^{-1} of green aerial biomass when harvested at the grain-filling stage. Pearl millet plants accumulate nutrients in their aerial parts in the following descending order: $\text{K} > \text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$. The total amounts of nutrients required to produce one megagram of total DM of pearl millet are: 7.8 to 13.52 kg N; 1.10 to 1.65 kg P; 8.52 to 18.48 kg K; 4.6 to 8.92 kg Ca; 2.33 to 2.97 kg Mg; 10.0 g B; 7.0 g Cu; 60.0 to 90.0 g Fe; 30.0 to 50.0 g Mn; and 5.0 to 10.0 g Zn.

Keywords: *Pennisetum glaucum*; thermal requirement; accumulated biomass; nutritional efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET _o) registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)	28
Figura 2 – Valores de umidade relativa do ar registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)	28
Figura 3 – Temperatura máxima, mínima e média do ar registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)	29
Figura 4 – Caracterização do solo área experimental (A), com detalhe de perfil aberto para coleta de amostras (B)	30
Figura 5 – Croqui representativo da área experimental cultivada com milho granífero ANm 05, mostrando a distribuição das parcelas, subparcelas e blocos	32
Figura 6 – Croqui representativo da área experimental cultivada com milho forrageiro ANm 07, mostrando a distribuição das parcelas, subparcelas e blocos	32
Figura 7 – Injetor de fertilizante tipo tanque de derivação (pulmão)	33
Figura 8 – Uso de tensiômetro digital de punção para monitoramento da umidade do solo da área experimental	34
Figura 9 – Acúmulo térmico ao longo do ciclo em 2022 (A) e 2023 (B)	37
Figura 10 – Produção de grãos de plantas de milho ANm 05, submetido à diferentes níveis de adubação N-P-K, considerando-se os valores médios obtidos nas distintas épocas de coleta	38
Figura 11 – Produção média de grãos de plantas de milho ANm 05, submetido à 150% da recomendação de adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	39
Figura 12 – Produção de biomassa fresca total da parte aérea de plantas de milho ANm 07 submetido à diferentes níveis de adubação N-P-K	41
Figura 13 – Acúmulo médio de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido a diferentes níveis de adubação N-P-K	45
Figura 14 – Produção de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido a diferentes níveis de adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	46

Figura 15 – Acúmulo total de matéria seca da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A), e ANm 07 (B), submetido à 150% da adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	47
Figura 16 – Acúmulo total de nitrogênio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	51
Figura 17 – Acúmulo total de fósforo na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	52
Figura 18 – Acúmulo total de potássio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	53
Figura 19 – Acúmulo total de cálcio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	53
Figura 20 – Acúmulo total de magnésio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	54
Figura 21 – Acúmulo total de boro na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	57
Figura 22 – Acúmulo total de cobre na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	58
Figura 23 – Acúmulo total de ferro na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	60
Figura 24 – Acúmulo total de manganês na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	61
Figura 25 – Acúmulo total de zinco na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação N-P-K, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Três principais fases de crescimento e nove estádios de desenvolvimento morfológicamente distintos da planta de milho em relação ao colmo principal	14
Tabela 2 – Atributos químicos do solo da área experimental nas camadas 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m de profundidade, antes da instalação dos experimentos	30
Tabela 3 – Caracterização granulométrica do solo da área experimental nas camadas 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m de profundidade, antes da instalação dos experimentos	31
Tabela 4 – Níveis de adubação NPK do solo da área experimental conforme recomendação de adubação para a cultura do milho	33
Tabela 5 – Resumo da análise de variância para o acúmulo de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)	42
Tabela 6 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de macronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 05, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)	49
Tabela 7 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de macronutrientes na parte aérea de plantas de milho grânifero ANm 07, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)	50
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de micronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 05, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)	56
Tabela 9 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de micronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 07, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 FENOLOGIA E EXIGÊNCIA TÉRMICA DO MILHETO	14
2.2 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA PELO MILHETO	15
2.3 EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS DA CULTURA DO MILHETO	17
2.4 ABSORÇÃO, ACÚMULO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO MILHETO	19
2.4.1 Nitrogênio	20
2.4.2 Fósforo	21
2.4.3 Potássio	22
2.4.4 Cálcio	23
2.4.5 Magnésio	23
2.4.6 Boro	24
2.4.7 Cobre	24
2.4.8 Ferro	24
2.4.9 Manganês	25
2.4.10 Zinco	25
3 MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	27
3.2 MATERIAL VEGETAL	31
3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS	31
3.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	34
3.5 COLETA DE DADOS E ANÁLISES	35
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 DESEMPENHO PRODUTIVO	37
4.2 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA	42
4.3 ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES	48
4.4 ACÚMULO DE MICRONUTRIENTES	56

5 CONCLUSÕES	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	75

1 INTRODUÇÃO

A espécie de milheto mais difundida no Brasil é o *Pennisetum glaucum* L. R. BR. Por suas características agronômicas, alta resistência à seca, adaptação a solos de baixa fertilidade, crescimento rápido e elevada produção de massa e grãos, essa espécie tem se mostrado uma das melhores opções para cobertura de solos em áreas de plantio direto no Centro do Brasil. Também é indicada para produção de grãos nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sul do país (Theodoro *et al.*, 2023). O milheto apresenta boa adaptação a essas condições, por uma combinação de importantes períodos de curta duração em desenvolvimento e considerável plasticidade de desenvolvimento, maximizando o uso da umidade disponível no solo (Frasca *et al.*, 2020).

Segundo a FAO (2022), foram produzidos mais de 30 milhões de toneladas do cereal no mundo para alimentação humana e animal. Os grãos de milheto têm sido cada vez mais utilizados na alimentação de aves como substituto do milho, devido ao seu menor custo (Murakami *et al.*, 2009). Além disso, apresentam alto potencial como alimento para humanos, por serem isentos de glúten, mais ricos em fibras alimentares que o arroz e contêm maiores quantidades de aminoácidos essenciais, como leucina, isoleucina e lisina, em comparação a outros cereais tradicionais, como trigo e centeio (Dias-Martins *et al.*, 2018).

Em que pese a importância do milheto para o país e, sobretudo, para a região semiárida do Nordeste, a produtividade dessa cultura ainda é muito negligenciada entre os produtores e, na maioria das vezes, muito aquém em relação ao potencial produtivo da cultura. É preciso estudar e entender como ocorre o crescimento e o desenvolvimento da planta de milheto, usando práticas de produção mais eficientes para obter maiores produtividades e, conseqüentemente, maiores lucros. Isso respalda a necessidade de trabalhos para definir as mais eficientes tecnologias de fertilização, de irrigação e de manejo da cultura capaz de aumentar, a curto prazo, a produtividade e a qualidade dos produtos, concorrendo para o produto ser mais competitivo nos mercados nacional e internacional (Oliveira, 2018).

Para fertirrigação do milheto exige-se que haja um equilíbrio entre as doses de fertilizantes e a lâmina hídrica a ser aplicada durante cada fase fenológica da cultura, os quais são fatores determinantes na concentração de nutrientes na água de irrigação; dessa forma, tal concentração deve ser estabelecida de modo que atenda o requerimento de nutrientes em cada fase do ciclo da cultura. Dados sobre extração de macro e micronutrientes pelo milheto são obtidos por meio de estudos de marcha de acúmulo de matéria seca e nutrientes ao longo do ciclo da cultura (Petrucchi, 2025).

O estudo da dinâmica de absorção de nutrientes e da produção de matéria seca, em função do estágio de desenvolvimento das culturas, é de fundamental importância. Ele subsidia estratégias para definir as quantidades e os momentos ideais de aplicação de fertilizantes, bem como os níveis mínimos que devem ser repostos ao solo para manutenção da fertilidade. Esses dados contribuem para o aumento da eficiência no manejo das culturas, proporcionando ganhos em produtividade e redução de custos, com o consequente uso racional e eficiente dos insumos aplicados no solo. Neste aspecto, é claro e evidente a necessidade de se conhecer o balanço de nutrientes do milho para predição do manejo da adubação por meio da otimização da aplicação de fertilizantes ao longo do ciclo da cultura (Souza *et al.*, 2023).

Contudo, entender o ciclo da planta de milho baseando-se somente na sua idade pode levar a equívocos de interpretação. O uso dos estágios fenológicos como referência para definir as épocas de tratos culturais, em vez do método baseado em períodos após a emergência ou semeadura, reduz erros de interpretação causados por diferenças entre cultivares e pelas condições edafoclimáticas na determinação da duração de cada estágio. Embora a maioria dos trabalhos da literatura tenha definido a marcha de absorção em função de dados cronológicos (em dia), com a adoção de dados de acúmulo térmico (graus-dia), têm-se obtido robustas correlações com a duração do ciclo da cultura, ou com os estágios do desenvolvimento fenológico de uma dada cultivar (Renato *et al.*, 2013).

Tendo em vista que estudos tropicais antigos indicavam determinados padrões, e que o melhoramento genético tem produzido cultivares cada vez mais produtivas e precoces, estudos atuais sobre absorção de nutrientes e acúmulo de matéria seca podem revelar diferenças nas épocas e quantidades de nutrientes requeridas. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar a produção, a absorção de nutrientes e o acúmulo de matéria seca na parte aérea de plantas de milho, em função dos estágios fenológicos e dos graus-dias acumulados, utilizando cultivares de alto potencial produtivo submetidas a diferentes níveis de adubação NPK.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FENOLOGIA E EXIGÊNCIA TÉRMICA DO MILHETO

Estádios de crescimento e desenvolvimento do milheto, assim para outros cereais, têm três períodos bem definidos de crescimento e, por meio de estudos de vários autores, pode-se definir, dessas fases de crescimento, nove estágios de desenvolvimento. O sistema mais comumente adotado para a divisão do ciclo da planta de milheto em estádios fenológicos é o proposto por Maiti e Bidinger (1981) e por Khairwal, Ram e Chhabra (1990) (Tabela 1). Nesse sistema, a divisão entre os estádios é determinada pela ocorrência de eventos fisiológicos na planta, como o surgimento de folhas totalmente expandidas (limbo, bainha e aurícula evidentes), o aparecimento das estruturas reprodutivas e a consistência dos grãos. A maturidade fisiológica é considerada quando se observa o aparecimento da camada negra na interseção do grão com a panícula. O uso do sistema de estádios fenológicos como referência para definir as épocas de tratos culturais, em vez do método baseado em períodos após a emergência ou semeadura, reduz erros de interpretação causados por cultivares e condições edafoclimáticas na determinação da duração de cada estágio.

Tabela 1 – Três principais fases de crescimento e nove estádios de desenvolvimento morfollogicamente distintos da planta de milheto em relação ao colmo principal

Estádios	Identificação da característica
FC 1 – Fase de Crescimento 1:	Fase Vegetativa
- E 0	Emergência
- E 1	Três folhas
- E 2	Cinco folhas
- E 3	Iniciação da panícula
FC 2 – Fase de Crescimento 2:	Fase de Desenvolvimento da Panícula
- E 4	Folha bandeira
- E 5	Estádio de emborrachamento
- E 6	Estádio 50% florescimento
FC 3 – Fase de Crescimento 3:	Fase de Enchimento de Grão
- E 7	Estádio leitoso
- E 8	Estádio pastoso/farináceo
- E 9	Maturidade fisiológica

Quanto ao padrão de desenvolvimento, os intervalos de tempo específicos entre os estádios fenológicos podem variar entre os diversos cultivares. Com isso, cultivares de milheto

podem florescer mais cedo ou mais tarde, como também desenvolver menos ou mais folhas (Santos *et al.*, 2018).

Scheffer-Basso, Agranionik e Fontaneli (2004), ao comparar o acúmulo de biomassa e composição bromatológica entre os milhetos cv. Africano e cv. Comum, na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, encontraram uma relação positiva entre o acúmulo de biomassa total (MST) e dos seus componentes e o tempo térmico. Os melhores ajustes aos dados de acúmulo de biomassa seca em função do tempo térmico foram obtidos com modelos lineares e quadráticos. Assim, na média dos dois cultivares, obteve-se um acúmulo linear de MST, culminando com aproximadamente 13 Mg MS ha⁻¹ aos 1023 GD, o que correspondeu, para as condições climáticas do trabalho, a 86 dias de crescimento após a emergência.

Costa *et al.* (2005), ao avaliar o efeito da época de semeadura sobre a fenologia, unidades térmicas e produção de biomassa e grãos de genótipos de milho, concluíram que o ciclo da cultura e a quantidade de unidades térmicas necessárias são maiores no plantio das águas do que no da seca. Encontraram, para a época de seca, acúmulos térmicos variando de 1052 a 1123 graus-dia (74 a 80 dias após a emergência), enquanto para a época das águas, a quantidade de unidades térmicas foi de 1239 a 1352 graus-dia (76 a 84 dias após a emergência).

2.2 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA PELO MILHETO

O milho é uma planta C4 que não se satura por intensidade luminosa, sendo altamente eficiente no aproveitamento da luz (Rosolem *et al.*, 2010). Nesta cultura, observa-se uma estreita relação entre o rendimento e a sua capacidade de aproveitamento da energia solar. Contudo, a eficiência da conversão da energia luminosa em matéria seca depende de um conjunto de fatores fisiológicos da planta e de condições externas ou ecológicas (Amaral *et al.*, 2011). De maneira geral, na comunidade acadêmica, é aceito que qualquer condição, intrínseca ou extrínseca à planta, que incremente a intensidade fotossintética das folhas, propicia um aumento na produção de matéria seca da planta.

Fatores como área foliar, teor de clorofila, grau de reflexão da luz pelo albedo, arquitetura foliar da cultivar, intensidade e qualidade da luz incidente, dinâmica das trocas gasosas (Costa *et al.*, 2020), disponibilidade de água no solo (Almeida *et al.*, 2017; Masetto *et al.*, 2016;), fertilidade do solo (Nicolau Sobrinho *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2010), arranjo espacial das plantas (Domukoski *et al.*, 2014; Trindade *et al.*, 2017) e tipo de grão (Oliveira *et al.*, 2002) exercem influência significativa na acumulação de matéria seca na planta. Ademais, cultivares com características semelhantes (produção, tipo de grão, porte e ciclo), de modo

geral, tendem a acumular matéria seca em quantidades semelhantes (Guimarães *et al.*, 2013; Morrill *et al.*, 2012).

Segundo Almeida *et al.* (2017) que avaliaram o crescimento vegetativo de duas cultivares de milho submetidas a diferentes níveis de água no solo, o crescimento da cultura é uma função linear do tempo e a curva do peso de matéria seca da planta inteira é ligeiramente sigmoide. De acordo com Moraes *et al.* (2008), esta curva é linear, dos 45 aos 75 dias, com o máximo acúmulo ocorrendo aos 90 dias após o plantio, quando começa a decrescer o peso total da planta, provavelmente devido à queda de folhas senescentes. Os resultados obtidos por estes autores são semelhantes aos obtidos por Padovan *et al.* (2012).

A curva de acúmulo de matéria seca na parte aérea da planta de milho em função do tempo tem taxa máxima próxima ao florescimento e um acúmulo contínuo e significativo a partir do início da formação das panículas até a maturidade fisiológica (Braz *et al.*, 2004; Moraes *et al.*, 2008; Padovan *et al.*, 2012). É relatada redução na quantidade de matéria seca, no final do ciclo da planta, especialmente após a formação da metade da massa total de grãos (Buso *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2011). Isto, provavelmente, ocorre devido à perda de parte das folhas despedaçadas e à lixiviação de potássio das folhas e do colmo, além do aumento da capacidade de dreno da panícula.

As taxas de acumulação de matéria seca durante o primeiro estágio de desenvolvimento (ED1) são baixas, face à pequena área foliar da planta. Nessa fase, a maior parte da matéria seca produzida vem das folhas e raízes. O crescimento foliar continua durante o segundo estágio de desenvolvimento (ED2), com o primeiro broto principal e, então, os perfilhos expandem suas folhas. Contudo, na fase de florescimento, o crescimento foliar na maioria dos perfilhos, bem como no colmo principal, é encerrado, sendo que o peso seco foliar permanece constante ou decresce levemente pela senescência das folhas inferiores (Marcelo; Corá; Fernandes, 2012).

O crescimento do colmo de milho inicia lento após a iniciação floral, representando uma fração da matéria seca total da planta durante a fase ED2. Na fase do florescimento, o colmo compõe cerca de 2/3 do peso seco da planta. A matéria seca no colmo da planta continua a aumentar após o florescimento, tanto no colmo principal, com alguns dos perfilhos, além da rápida elongação do colmo. Pode também ocorrer redistribuição de fotoassimilados do colmo para enchimento de grãos, quando a disponibilidade de carboidratos for limitada. Nessas condições, o colmo atua como um depósito de armazenamento para o excesso de carboidratos ou uma fonte de oferta de carboidratos para enchimento de grão (Soratto *et al.*, 2012).

Nas folhas de plantas de milho, o acúmulo de matéria seca é relativamente lento no início do desenvolvimento vegetativo. Todavia, após este período, ocorre incremento

considerável na acumulação de matéria seca, sendo máxima no florescimento. Durante o estágio de desenvolvimento 3 (ED3) observa-se um maior aumento na matéria seca da planta na panícula, uma vez que os perfilhos atingem o florescimento e os grãos cheios em todas as panículas. A partição final de matéria seca na folha, colmo e panícula variam amplamente em milho, dependendo da variedade. Nas variedades de porte anãs, de alta produtividade, 50% da matéria seca deve estar particionada nas panículas, com o restante alocado entre os colmos e as folhas, em razão de aproximadamente 3:1 (Rodrigues *et al.*, 2012). O milho acumula elevadas quantidades de matéria seca, atingindo o máximo aos 90 dias após o plantio (10,3 Mg ha⁻¹). Os maiores acúmulos diários de massa seca (101,2 a 180,0 kg ha⁻¹ dia⁻¹) ocorreram até os 75 dias após o plantio. Entre 60 e 75 dias após o plantio, a gramínea já se encontrava no início da formação de grãos (Moraes *et al.*, 2008).

Silva *et al.* (2010) ao avaliarem a produção de matéria seca (MS) pelo milho, em cultivos isolado e consorciado, observaram que a cultura apresentou produção média de 14.040 kg ha⁻¹ de MS. Contudo, Cazetta *et al.* (2005), aos 60 dias após emergência, Crusciol e Soratto (2007), aos 71 DAE, e Souza *et al.* (2008), aos 59 DAE, observaram produções inferiores, com valores de 10.673, 8.909 e 6.100 kg ha⁻¹, respectivamente.

2.3 EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS DA CULTURA DO MILHO

O milho é uma cultura com alto potencial produtivo, evidenciado por produtividades de até 70 t ha⁻¹ de massa verde e de grãos, que podem variar de 1.568 a 2.452 kg ha⁻¹, no Brasil, em condições de emprego de tecnologias adequadas (Trindade *et al.*, 2017). Contudo, na prática, observam-se rendimentos da cultura, seja devido aos baixos níveis de nutrientes presentes nos solos, ou pelo uso inadequado de corretivos e fertilizantes e o cultivo predatório do milho colhido para a produção de forragem (Bonamigo, 1993).

A implantação e a condução de uma lavoura de milho visam obter alta produtividade e lucro com a venda do produto colhido. Além de condições ambientais favoráveis, como a melhor época de plantio, boas condições edafoclimáticas, requer ainda muitas e oportunas decisões da parte do agricultor, em geral, baseadas nas recomendações técnicas oriundas de pesquisas; dentre estas, se destacam a escolha da variedade, da melhor alternativa de manejo cultural e o adequado manejo da adubação.

A maior parte do peso seco de um vegetal consiste em materiais orgânicos, produto da fotossíntese e de processos subsequentes. Os elementos essenciais de que a maioria das plantas necessita para completar seu ciclo são: C, O, H (fornecidos pelo ar e pela água); N, P, K

(macronutrientes primários); Ca, Mg, S (macronutrientes secundários) e B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn (micronutrientes). O suprimento adequado de cada nutriente em cada estágio de desenvolvimento da cultura é essencial para o ótimo crescimento em todos os estágios (Taiz; Zeiger, 2004). A planta de milho é considerada exigente em nutrientes, respondendo a aumentos nos níveis de adubação com ganhos crescentes em produtividade, respeitando-se o potencial produtivo da cultivar.

As necessidades nutricionais da planta de milho são determinadas pela quantidade de nutrientes que esta extrai durante o seu ciclo. A quantidade de nutrientes extraídos dependerá da produtividade obtida e da acumulação de nutrientes nos grãos e em outras partes da planta. É necessário, então, colocar à disposição da planta as quantidades de nutrientes que ela extrai, os quais devem ser repostos pelo solo e pelas adubações (Marschner, 1995).

Para a fertirrigação da cultura, deve-se ter definido quais as doses de nutrientes a se aplicar, bem como conhecer a absorção e a acumulação de nutrientes nas diferentes fases de desenvolvimento da planta, identificando as épocas de maior exigência da planta em cada nutriente. Para além dessas informações prévias, deve-se ter conhecimento sobre o potencial de perdas de nutrientes por lixiviação nos diferentes tipos de solos, como ferramenta de auxílio na identificação da necessidade de aplicação, parcelada ou não, de fertilizantes.

Os nutrientes utilizados pela cultura do milho podem ser afetados pelas condições do clima, pelas cultivares e pelos sistemas de manejo. São absorvidos durante todo o ciclo, sendo as diferenças verificadas nas taxas de acúmulo destes em função do ciclo e na sua redistribuição das folhas e dos colmos para os órgãos reprodutivos (Fernandes, 2006).

As recomendações oficiais de adubação para a cultura de milho no Brasil, dentre outras propostas por Cavalcanti (2008), contemplam doses de nutrientes baseadas na produtividade esperada e conforme o tipo de exploração (grãos ou forragem). Isto ocorre devido ao fato das plantas oriundas de cultivos que buscam maiores rendimentos extraírem e exportarem maiores quantidades de nutrientes, necessitando, portanto, de doses diferentes de fertilizantes. Contudo, essas recomendações dizem respeito a valores médios para um sistema radicular, explorando um volume pré-determinado de solo. Este procedimento generalizado é apenas um indicativo e precisa ser adequado para cada caso, dependendo da experiência de quem está planejando a adubação e de aspectos referentes à economicidade da exploração agrícola.

2.4 ABSORÇÃO, ACÚMULO E EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES PELO MILHETO

Acúmulo de nutrientes representa as quantidades destes na matéria seca de cada parte da planta (raiz, folha, caule, palha, sabugo e grãos). Absorção ou extração de nutrientes dizem respeito aos totais dos acúmulos de nutrientes ocorridos nas diferentes partes da planta. A quantidade do elemento retirada da área de plantio pelos produtos da colheita é denominada exportação de nutrientes, dependendo da finalidade da cultura (produção de forragem, grão) (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997).

As diferentes partes vegetativas que compõem uma planta durante seu ciclo de desenvolvimento podem funcionar como fonte ou como dreno. Conhecer como ocorre o acúmulo de nutrientes em cada uma dessas partes durante o ciclo é de fundamental importância para o conhecimento da dinâmica da relação fonte-dreno e, conseqüentemente, para estabelecer parâmetros de avaliação do seu estado nutricional e na definição de estratégias de fertilização da cultura.

O conhecimento das quantidades de nutrientes absorvidas e acumuladas nos diferentes estádios fenológicos da planta permite estimar as taxas que serão exportadas por meio da colheita de grãos ou forragem, e as que poderão ser restituídas ao solo pelos restos culturais. Com isso, é possível determinar as épocas em que os elementos são exigidos em maior quantidade e corrigir as deficiências que possam ocorrer durante o ciclo da cultura. Essas estratégias envolvem a definição das quantidades, bem como da época em que cada nutriente deve ser disponibilizado para a cultura. As quantidades extraídas variam em função da produtividade obtida, que depende de fatores como cultivar, disponibilidade de nutrientes e água, manejo da cultura e condições climáticas. (Marschner, 1995).

As diferenças entre as cultivares quanto ao acúmulo de nutrientes começam a surgir desde a época de formação do pendão, devido a fatores intrínsecos e extrínsecos à planta. Entretanto, as quantidades acumuladas de nutrientes dependem do nível de disponibilidade destes no solo, bem como da disponibilidade hídrica (Moraes *et al.*, 2008).

O milho quando cultivado para produção de grãos, terá a exportação de nutrientes menor do que quando o objetivo é a produção de massa verde para forragem; no primeiro caso, ocorre reposição de parte dos nutrientes extraídos por meio dos resíduos remanescentes da colheita (Pereira Filho, 2003).

A absorção de nutrientes no início do ciclo da cultura do milho é baixa. Nas primeiras semanas após a semeadura, quase não há absorção de nutrientes do solo, sendo os elementos contidos nas sementes mobilizados e translocados para raízes e parte aérea. Apesar da pequena

quantidade de nutrientes absorvidos no início do ciclo, recomenda-se que as concentrações destes na região do solo que circunda as raízes da planta naquele estágio devem ser altas. Após este período inicial, diferenças na absorção e acúmulo de nutrientes começam a surgir, devido a fatores intrínsecos e extrínsecos à planta (Rodrigues *et al.*, 2012).

Os nutrientes têm comportamento diferente quanto à mobilidade no solo e na planta. Segundo Malavolta (1980), a eficiência do fornecimento de nutrientes às plantas é dependente, dentre outros fatores, da mobilidade do nutriente no solo e na planta. Os nutrientes podem ser classificados, quanto à mobilidade na parte aérea das plantas, da seguinte maneira: altamente móveis (N e K), móveis (P e Cl), parcialmente imóveis (S, Zn, Cu, Fe e Mo) e imóveis (B e Ca).

Os macronutrientes, excetuando o Ca, têm maior mobilidade na planta e apresentam os sintomas de deficiência a partir das folhas mais velhas, já que podem ser redistribuídos das partes mais velhas da planta para as partes mais novas. Já os micronutrientes são pouco móveis, exceto o Mo, que apresenta mobilidade mediana. Assim, pode-se esperar que os sintomas de carência de micronutrientes apareçam, inicialmente, nos tecidos mais jovens das plantas (folhas apicais e extremidades de ramos).

As absorções de N, P, K, Ca e Mg aumentam com o acréscimo da produtividade da cultura do milho. O potássio é o nutriente absorvido em maior quantidade, seguido por N, Ca, Mg, P e S (Silva *et al.*, 2010). Matos *et al.* (2005), ao avaliarem a capacidade do milho de extrair nutrientes do solo, observaram extração de 253; 29,4; 316,54; 36,38; 28,9 kg ha⁻¹ para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente. Para os micronutrientes, Rodrigues *et al.* (2012) observaram extração de 415, 6616, 944, 316 g ha⁻¹ para B, Fe, Mn e Zn, respectivamente.

O milho apresenta dois diferentes períodos de intensa absorção de nutrientes; o primeiro ocorre durante a fase de desenvolvimento vegetativo, mais precisamente entre os estádios 1 e 3. O segundo período de intensa absorção é durante a fase de crescimento 2, entre ED 4 e ED6, quando o potencial de crescimento é atingido (Padovan *et al.*, 2012).

2.4.1 Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais importantes para o aumento da produtividade do milho, ao compor moléculas essenciais como proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, citocromos e clorofila. Em solos férteis ou adequadamente corrigidos, o N é o principal fator que determina os níveis de produtividade da cultura (Kluthcouski *et al.*, 2006).

No entanto, sua disponibilidade no solo é efêmera, e as plantas demandam excesso desse nutriente (Guilherme; Vale; Guedes, 1995).

A dinâmica do nitrogênio no solo é complexa devido à sua alta mobilidade e às transformações mediadas por microrganismos. Essa instabilidade torna o N mais difícil de ser retido na zona radicular em comparação com outros nutrientes. Além disso, seu efeito residual no solo é baixo, exigindo adubações nitrogenadas mais intensas e frequentes.

A translocação de açúcares e nitrogênio dos órgãos vegetativos (principalmente folhas) para os grãos está diretamente relacionada à formação dos grãos no milho (Rocha *et al.*, 2014). O N também influencia o crescimento radicular, o número de grãos por planta e o comprimento das panículas, contribuindo para o aumento da produtividade (Buzetti *et al.*, 2006). A manutenção de uma área foliar verde é crucial, pois folhas bem nutridas em N têm maior capacidade de assimilar CO₂ e sintetizar carboidratos, resultando em maior acúmulo de biomassa.

O acúmulo de N no milho segue uma tendência semelhante à da matéria seca, atingindo o pico entre 60 e 75 dias após o plantio (Moraes *et al.*, 2008). Segundo Braz *et al.* (2004), o máximo de acumulação ocorreu no intervalo de 52 a 55 dias após a germinação, e os valores estimados foram de 348 kg ha⁻¹.

As exigências de N variam conforme os estádios fenológicos da planta, sendo mínimas nas fases iniciais e atingindo o pico entre o florescimento e o início da formação de grãos (Priesnitz, 2009). Plantas jovens apresentam maior concentração percentual de N, embora a demanda quantitativa seja menor devido ao seu pequeno porte.

Perdas líquidas de N ocorrem durante a translocação para os órgãos reprodutivos, possivelmente devido à volatilização, baixa capacidade de armazenamento nas inflorescências ou retroinibição da absorção. A redução no acúmulo de N nos estádios finais também pode estar associada à volatilização de NH₃ durante a senescência foliar (Karlen; Flannery; Sadler, 1988).

As plantas jovens de milho apresentam maior concentração de nitrogênio (N) em seus tecidos em comparação com outras fases do ciclo (Marcante; Camacho; Junior, 2011). No entanto, o suprimento adequado desse nutriente é essencial para garantir altas produtividades de grãos.

2.4.2 Fósforo

O fósforo é essencial nos estádios iniciais do milho, pois sua deficiência reduz o número de panículas por área e, conseqüentemente, a produtividade (Mengel; Kirkby, 1987).

Embora seus efeitos sejam menos pronunciados que os do N, o P estimula o crescimento radicular, melhora a qualidade dos grãos e aumenta o teor de proteína.

Apesar de ser exigido em menores quantidades que outros macronutrientes, o P é aplicado em doses elevadas no Brasil devido à sua baixa mobilidade no solo, formando compostos insolúveis. A resposta do milho ao P é geralmente alta, especialmente em solos brasileiros, sendo naturalmente pobres nesse nutriente.

O P participa da fotossíntese, respiração, síntese de ácidos nucleicos, fosfolipídios, coenzimas NAD e NADP, ATP e outras moléculas energéticas, sendo vital para todos os processos metabólicos da planta.

O acúmulo de P no milho segue o mesmo padrão da matéria seca, com absorção contínua até a maturidade fisiológica. A demanda máxima ocorre por volta dos 55 dias após a germinação (Braz *et al.*, 2004).

2.4.3 Potássio

O potássio (K) é o segundo nutriente mais absorvido pelo milho (Santos *et al.*, 2021). Embora não integre nenhum composto estrutural da planta (Malavolta; Crocomo, 1982), ele desempenha funções essenciais em processos bioquímicos, como fotossíntese, respiração e metabolismo de carboidratos. Atua como ativador enzimático, influenciando sintetases, oxidoredutases, desidrogenases e quinases, além de estar diretamente associado à assimilação de CO₂ e nitrogênio. Seu efeito também se estende à formação de proteínas e ao armazenamento e translocação de açúcares. Adicionalmente, o K aumenta a eficiência fotossintética e a utilização da luz pelo milho, em parte devido à expansão da área foliar induzida por esse nutriente.

No solo, o K apresenta mobilidade semelhante à do nitrogênio. Como principal soluto inorgânico osmoticamente ativo nas plantas, é crucial para o crescimento e a extensão celular (Mengel; Kirkby, 1987). Além disso, regula processos hídricos, reduzindo a demanda por água e a perda por transpiração, graças ao seu papel no controle estomático e na osmorregulação celular. Essa eficiência no uso da água está associada à maior resistência do milho a estresses abióticos, como seca e baixas temperaturas, bem como as doenças e ao acamamento (Silva *et al.*, 2015). Na planta, o K é altamente móvel, movimentando-se livremente entre células, tecidos, xilema e floema (Malavolta; Vitti; Oliveira, 1997), comportamento compartilhado com N, P, Mg e S.

Diferentemente de N e P, o K atinge seu pico de acúmulo mais cedo, superando inclusive a absorção de N nas fases iniciais. O máximo acúmulo ocorre por volta dos 75 dias (Moraes *et al.*, 2008).

2.4.4 Cálcio

O cálcio (Ca) desempenha funções essenciais no milheto, atuando na absorção de íons, manutenção da integridade da membrana plasmática, formação da parede celular, divisão celular e regulação de processos metabólicos. Além disso, é indispensável para a germinação do grão de pólen e o crescimento do tubo polínico (Malavolta, 1980). Outro papel relevante está relacionado à assimilação de nitratos e à síntese de proteínas. No solo, o Ca apresenta mobilidade, porém sua disponibilidade pode ser limitada em solos ácidos ou intemperizados.

O acúmulo de Ca ocorre durante todo o desenvolvimento do milheto, com cerca de 83% sendo absorvido na fase vegetativa (Moraes *et al.* 2008). Além disso, outros autores concordam que a absorção de Ca é reduzida nos estádios iniciais do ciclo da cultura (Karlen; Flannery; Sadler, 1988).

2.4.5 Magnésio

O magnésio é um componente essencial da molécula de clorofila, desempenhando papel fundamental no processo fotossintético. Este nutriente também integra a composição da fitina nas sementes, sendo liberado com o fósforo durante a germinação para suprir o desenvolvimento de novos tecidos. Suas funções se estendem à ativação de enzimas-chave do metabolismo de carboidratos e ao transporte de fósforo na planta. Observa-se que magnésio e fósforo apresentam padrão similar de distribuição nos tecidos vegetais, com mobilização preferencial para os grãos durante a fase reprodutiva (Vasconcellos; Viana; Ferreira, 1998).

A dinâmica de acúmulo de magnésio no milheto ocorre ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento, com taxas mais elevadas durante o enchimento de grãos. Moraes *et al.* (2008) registraram o pico máximo de acúmulo aos 75 dias após o plantio, com ponto de inflexão na curva após esta fase. Embora apresente baixa absorção nas fases iniciais, semelhante ao cálcio, o magnésio demonstra correlação positiva significativa com a produção de matéria seca da parte aérea (Marcante; Camacho; Junior, 2011), evidenciando sua importância para o crescimento vegetativo.

2.4.6 Boro

Embora o boro (B) não tenha uma função metabólica específica claramente definida, sabe-se que ele está envolvido em diversos processos fisiológicos essenciais. Este micronutriente participa ativamente no metabolismo de carboidratos, facilitando o transporte de açúcares através das membranas celulares, além de atuar na síntese de ácidos nucleicos (DNA e RNA), na produção de fitormônios, na formação da parede celular e nos processos de divisão celular (Mengel; Kirkby, 1987). Sua importância é particularmente evidente no desenvolvimento dos tecidos jovens do milho, que apresentam alta demanda por esse elemento.

O boro é absorvido pelas plantas principalmente como ácido bórico ou borato. No milho, trata-se de um elemento imóvel no floema, o que significa que não pode ser translocado das partes mais velhas para os tecidos em crescimento ativo, como raízes ou brotações terminais. Essa imobilidade explica por que os sintomas de deficiência aparecem primeiro nos órgãos jovens, manifestando-se como interrupção do crescimento apical e necrose de folhas novas (Raij, 1991).

2.4.7 Cobre

O cobre (Cu) desempenha funções essenciais em diversos processos fisiológicos do milho, incluindo fotossíntese, respiração, distribuição de carboidratos, redução e fixação de nitrogênio, além do metabolismo de proteínas e paredes celulares (Xu *et al.*, 2024). Esse micronutriente também regula o balanço hídrico nas plantas e participa da síntese de RNA e DNA. Sua deficiência pode comprometer significativamente a produção de sementes, aumentando a esterilidade do pólen. Adicionalmente, o Cu está envolvido nos mecanismos de resistência a doenças (Mengel; Kirkby, 1987).

2.4.8 Ferro

O ferro é um elemento essencial para os processos energéticos e metabólicos das plantas, sendo componente fundamental de hemoproteínas e outras proteínas não-heme. Ele desempenha funções vitais na cadeia de transporte de elétrons durante a fotossíntese, na redução de nitritos e sulfatos, no metabolismo de ácidos nucleicos e na biossíntese de clorofila. Os íons

Fe^{2+} e Fe^{3+} atuam ainda como importantes cofatores enzimáticos em diversas reações bioquímicas (Chaudhary *et al.*, 2025).

2.4.9 Manganês

O manganês (Mn) desempenha funções fundamentais no metabolismo vegetal, atuando como ativador enzimático em diversos processos fisiológicos. Ele participa ativamente do metabolismo do nitrogênio e facilita a ligação entre o ATP e as enzimas transferidoras de grupos fosfato (Marschner, 1995). Sua ação é particularmente importante no ciclo de Krebs, onde ativa enzimas como descarboxilases e desidrogenases, além de participar, com o cloro, do processo de fotólise da água no fotossistema II durante a fotossíntese.

No estudo realizado por Braz *et al.* (2004), que avaliaram a dinâmica de nutrientes no limbo foliar do milho em função do tempo após a emergência, observou-se que o acúmulo máximo de manganês (Mn) atingiu 3797 g ha^{-1} , ocorrendo por volta de 50 dias após a emergência das plantas. Esse resultado destaca que o Mn, um micronutriente importante para processos enzimáticos e fotossintéticos, como a germinação, maturação e biossíntese de clorofila, além de melhorar a disponibilidade de fósforo e cálcio para as plantas. O Mn apresenta maior absorção e translocação para as folhas do milho durante a fase vegetativa ativa, antecedendo o período reprodutivo. A janela de aproximadamente 50 dias após a emergência pode ser considerada crítica para o manejo eficiente desse nutriente na cultura. Essa fase coincide com o período de intensa atividade metabólica relacionada à formação e enchimento de grãos, quando os processos dependentes do ferro se tornam mais ativos.

A deficiência de manganês provoca alterações na estrutura dos cloroplastos, comprometendo sua funcionalidade. É importante destacar que o Mn apresenta mobilidade foliar, podendo ser perdido por lixiviação durante o ciclo vegetativo, o que pode afetar sua disponibilidade para a planta em condições de chuvas intensas.

2.4.10 Zinco

O zinco (Zn) destaca-se como um dos micronutrientes mais importantes para o milho, exercendo influência direta no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da cultura. Estudos demonstram que sua aplicação promove aumento significativo na altura das plantas, número de folhas, produção de forragem e grãos, além de elevar o teor de nitrogênio e proteína nos grãos (Mousavi, 2011). Em solos deficientes em Zn, as plantas de milho apresentam sistema

radicular superficial e falhas na formação de panículas, problema particularmente relevante em solos intemperizados, onde a deficiência desse nutriente é comum (Fageria, 2000).

Do ponto de vista fisiológico, o zinco desempenha funções cruciais no metabolismo de carboidratos, proteínas e sulfatos, além de participar da síntese de auxinas, RNA e ribossomos. Sua deficiência provoca o encurtamento dos entrenós e redução do crescimento, consequência da menor produção de triptofano — aminoácido precursor do hormônio AIA, essencial para o desenvolvimento vegetal (Malta *et al.*, 2002).

A Absorção De Zn Pelo Milheto É Influenciada Pelo Ph Do Solo (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2007) e pelos teores de fósforo nos tecidos vegetais. Braz *et al.* (2004) revelaram que o acúmulo de zinco no limbo foliar de plantas de milho tem ponto máximo entre 44 e 55 dias após a emergência, atingindo 461 g ha⁻¹.

3 MATERIAL E MÉTODOS

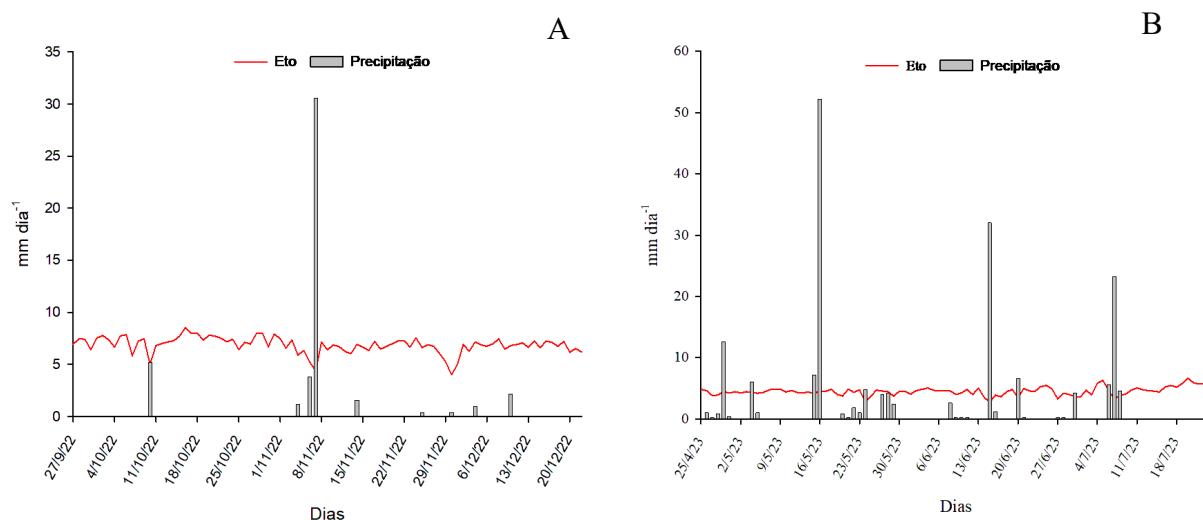
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi realizada em condições de campo, na área experimental do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN), *Campus Apodi* – RN. A área experimental estava situada a 05° 37' 35" de latitude Sul e a 37° 48' 35" de longitude oeste, e a uma altitude de aproximadamente 131 metros. No primeiro ciclo, realizado em 2022, o experimento foi de 27 de setembro a 22 de dezembro, totalizando 86 dias após a semeadura. Já no segundo ciclo, ocorrido em 2023, o experimento foi de 25 de abril a 24 de julho, totalizando 90 dias após a semeadura. Os dois períodos de cultivo avaliados neste estudo representam condições climáticas contrastantes típicas do semiárido nordestino brasileiro. Essa variação sazonal permitiu avaliar o comportamento das cultivares de milho sob diferentes regimes térmico-hídricos característicos da região:

Conforme a classificação de Köppen (1956), o clima da região é semiárido quente e seco, com temperaturas elevadas durante o dia, amenizando a noite, apresentando variações anuais em um intervalo 23 a 30° C, com eventuais picos mais elevados, principalmente durante o período de estação de estiagem. O regime pluviométrico, além de baixo, é irregular, com médias anuais em torno de 900 mm (CPRM, 2005).

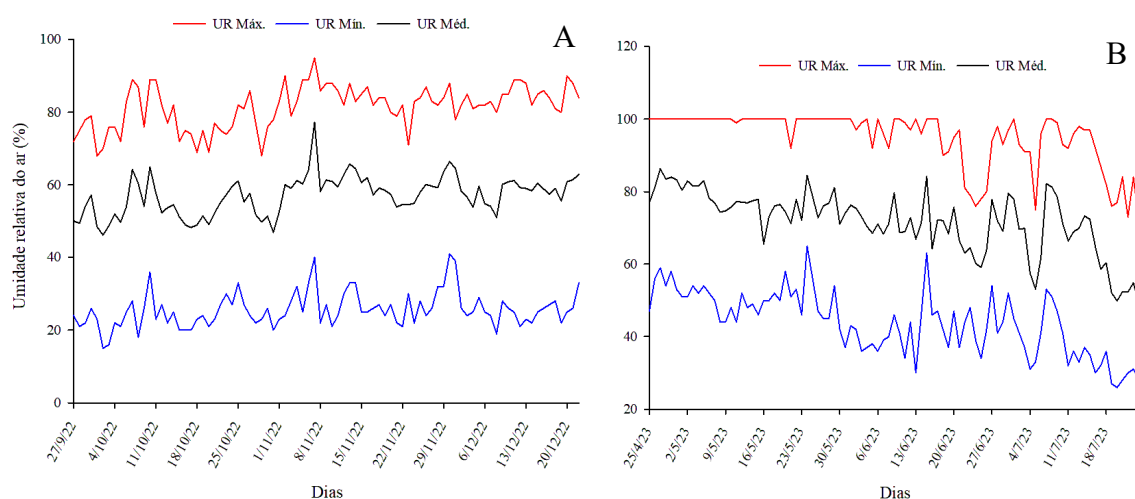
As leituras das variáveis meteorológicas durante a condução do experimento nas duas épocas (2022; 2023) (Figuras 1, 2 e 3) foram obtidas da estação meteorológica automática n.º A340 do Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet, localizada na Estação Experimental de Apodi, pertencente a Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte S/A – Emparn, situada nas coordenadas 5° 37' 36" S e 37° 48' 54" W, a 131,37 metros de altitude, que fica cerca de 200 m da área experimental. A partir dos dados climáticos, foi determinada a evapotranspiração de referência (ET_o) durante o todo o ciclo de desenvolvimento das cultivares através do método FAO Penman-Monteith (Figura 1) (Allen *et al.*, 1998).

Figura 1 – Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência (ET_o) registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)



No experimento realizado em 2022, a ET_o total registrada no período foi de 598,29 mm, com média de 6,87 mm dia⁻¹ e com precipitação total de 46,4 mm. Já no ano de 2023, a ET_o total registrada no período foi de 409,48 mm, média de 4,49 mm dia⁻¹, com precipitação total de 181,8 mm.

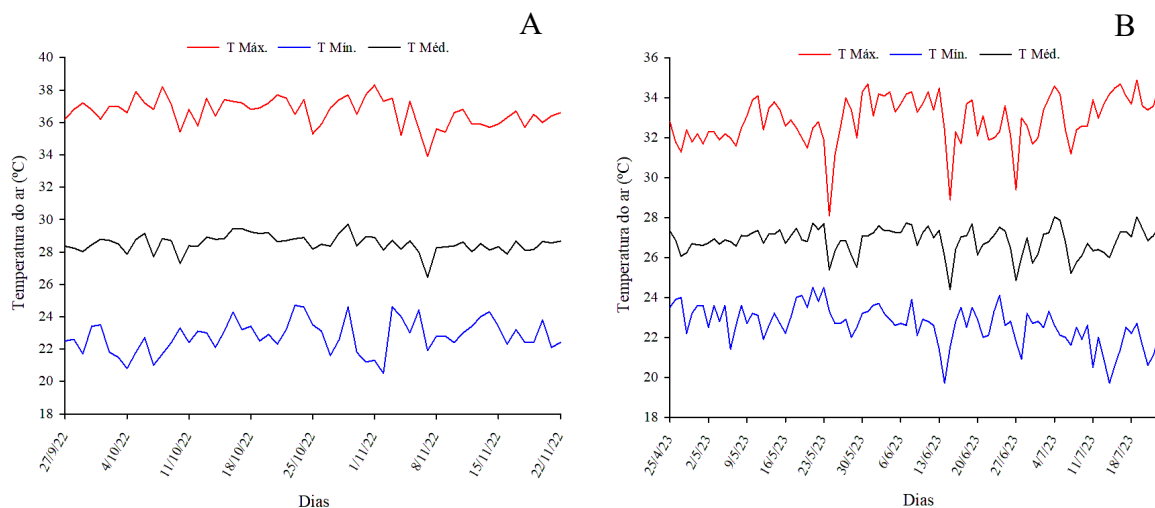
Figura 2 – Valores de umidade relativa do ar registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)



A média de umidade relativa do ar máxima no experimento realizado em 2022 foi de 81,45%, com 25,57%, em média, para a umidade relativa do ar mínima. A umidade relativa do ar média, nesse período, foi de 57,08%. No ano de 2023, observaram-se valores médios de

95,08, 43,92% para umidade relativa do ar máxima e mínima, respectivamente. A umidade relativa do ar média, no experimento reproduzido em 2023, foi 71,83%.

Figura 3 – Temperatura máxima, mínima e média do ar registrados no período de condução do experimento entre os meses de setembro e dezembro de 2022 (A) e entre os meses de abril e julho de 2023 (B)



A temperatura média máxima do ar registrada no período de condução do experimento no ano de 2022 foi de 36,58 °C, enquanto a temperatura média mínima do ar nesse mesmo período foi de 22,83 °C. Já para a temperatura média do ar registrada foi de 28,47 °C. Em 2023, a temperatura média máxima do ar registrada no período entre os meses de abril e julho foi de 32,91 °C, enquanto a temperatura média mínima registrada foi de 22,61 °C. Para a temperatura média do ar, registraram-se 26,85 °C.

O solo da área experimental (Figura 4), classificado como Cambissolo Háplico (CX) (Santana Junior, 2010), apresentava histórico de cultivos sucessivos de gramíneas forrageiras para corte, em sistema irrigado e/ou sob sequeiro. Esse uso anterior proporcionou ao solo características favoráveis ao desenvolvimento da cultura do milho, incluindo boa estrutura física, fertilidade estabelecida por adubações regulares e estabilidade de agregados nas camadas superficiais (0 - 40 cm de profundidade). A escolha desta área permitiu avaliar o desempenho das cultivares em condições reais de produção, representativas dos sistemas agrícolas da região semiárida do Nordeste brasileiro.

Figura 4 – Caracterização do solo em área experimental (A), com detalhe de perfil aberto para coleta de amostras (B)



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m para caracterização química e nas camadas de 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m para caracterização granulométrica (Tabela 2 e 3).

Tabela 2 – Atributos químicos do solo da área experimental nas camadas 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m de profundidade, antes da instalação dos experimentos

Atributo químico	Camada 0 – 0,20 m	Atributo químico	Camada 0,20 – 0,40 m
pH em água 1:2,5	7,6 Af	pH em água 1:2,5	7,6
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	1,47 M	Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	16,62
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	2,27 Mb	Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,10
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,67 Mb	K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,43
Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,23	Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,37
Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00 Mbx	Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00
H ⁺ + Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00 Mbx	H ⁺ + Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00
CTC, cmol _c dm ⁻³	4,64 B	CTC, cmol _c dm ⁻³	20,52
V, %	100,00 Mb	V, %	100,00
SAl, %	0,00	SAl, %	0,00
SNa, %	4,88	SNa, %	1,82
P, mg dm ⁻³	13 Mbx	P, mg dm ⁻³	3
Cu, mg dm ⁻³	0,67 B	Cu, mg dm ⁻³	0,56
Fe, mg dm ⁻³	4,97 Mbx	Fe, mg dm ⁻³	3,97
Mn, mg dm ⁻³	9,66 B	Mn, mg dm ⁻³	4,98
Zn, mg dm ⁻³	1,23 M	Zn, mg dm ⁻³	1,00
B, mg dm ⁻³	0,12 Mbx	B, mg dm ⁻³	0,28

K, Na, P, Cu, Fe, Mn, Zn: Extrator Mehlich 1; Al, Ca, Mg: Extrator KCl 1 mol L⁻¹; Al + H: Extrator acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0; B: extração com água quente; CTC = (SB + H⁺ + Al³⁺); Ae= alcalinidade fraca; Mbx= muito baixo; Bx = baixo; M= médio; B= bom; Mb = muito bom; A= alto; de acordo com Alvarez V. *et al.* (1999).

Tabela 3 – Caracterização granulométrica do solo da área experimental nas camadas 0 a 0,20 m, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m de profundidade, antes da instalação dos experimentos.

Fração	Camada	Camada	Camada
	0 a 0,20 m	0,20 a 0,40 m	0,40 a 0,60 m
Areia (g kg ⁻¹)	637	500	485
Silte (g kg ⁻¹)	240	420	420
Argila (g kg ⁻¹)	123	80	95
Classificação	Franco Argilo Arenoso	Argila Arenosa	Argila Arenosa

3.2 MATERIAL VEGETAL

Foram utilizadas duas cultivares de milheto (ANm 05 e ANm 07), ambas desenvolvidas pela empresa Agro Norte Pesquisa e Sementes LTDA, com características diferentes de ciclo e utilização, e comprovadamente com alto potencial produtivo nas condições tropicais do Brasil. A cultivar ANm 05 foi desenvolvida com aptidão para produção de grãos. Já a cultivar ANm 07 foi selecionada para produção de forragem e utilização como planta de cobertura para produção de palhada.

3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com quatro repetições, em esquema de parcelas subdivididas, sendo quatro níveis de adubação dispostos nas parcelas e, nas subparcelas, as épocas de coleta das plantas, considerando os estádios fenológicos da cultura do milheto, conforme Maiti e Bidinger (1981) e Khairwal, Ram e Chhabra (1990). Os quatro níveis de adubação testados foram estabelecidos com base na recomendação NPK de Cavalcanti (2008) para a cultura do milheto, considerando os resultados da análise química do solo da área experimental. As doses de nutrientes aplicadas em cada tratamento foram: 0% (Controle) – Sem aplicação de fertilizantes NPK; 50% da recomendação; 100% da recomendação e 150% da recomendação. Estes níveis foram definidos para avaliar a resposta das cultivares a diferentes disponibilidades de nutrientes, mantendo a proporção entre os elementos conforme a recomendação técnica para a cultura (Figuras 5 e 6).

Figura 5 – Croqui representativo da área experimental cultivada com milho granífero ANm 05, mostrando a distribuição das parcelas, subparcelas e blocos

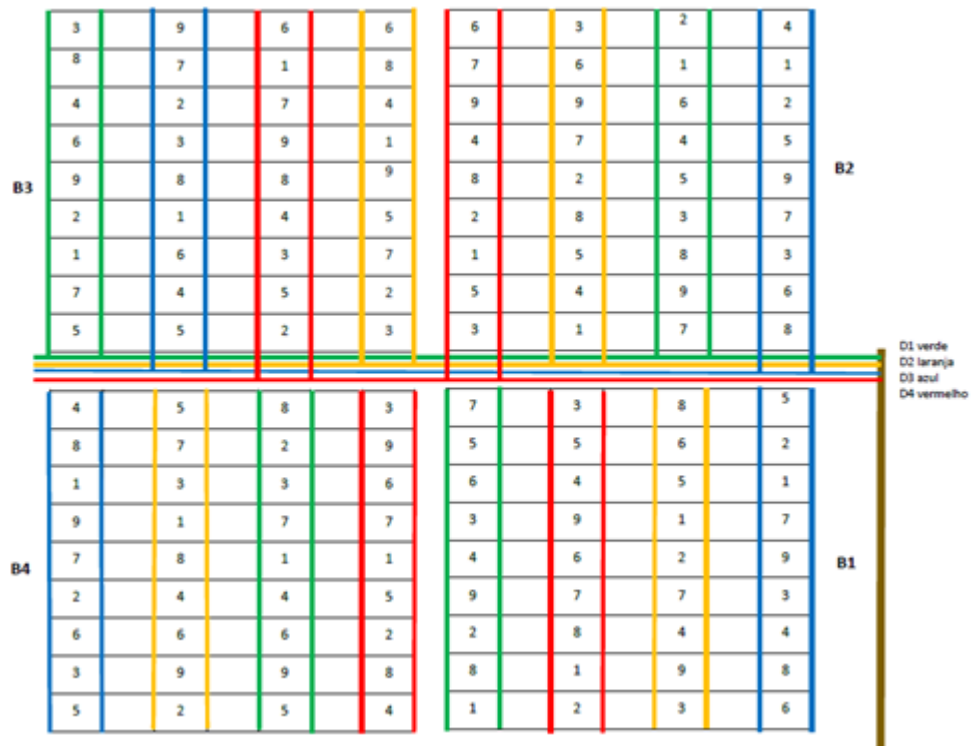
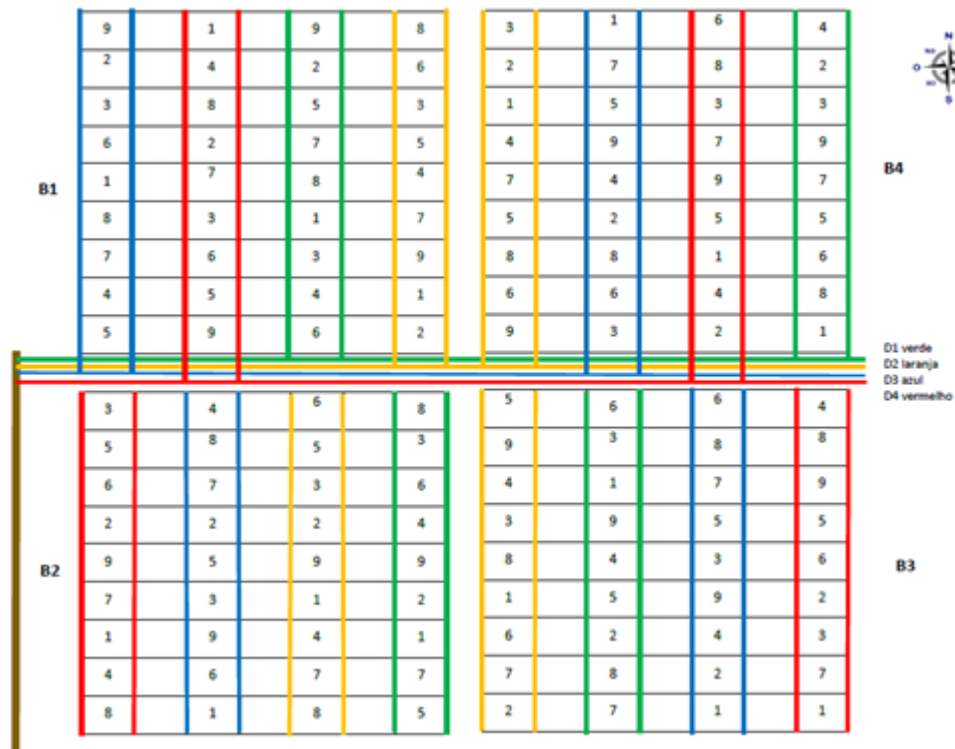


Figura 6 – Croqui representativo da área experimental cultivada com milho forrageiro ANm 07, mostrando a distribuição das parcelas, subparcelas e blocos



As doses específicas de cada nutriente aplicadas nos diferentes tratamentos são apresentadas a seguir (Tabela 4).

Tabela 4 – Níveis de adubação NPK do solo da área experimental conforme recomendação de adubação para a cultura do milheto

Níveis de adubação (%)	Nutrientes (kg ha ⁻¹)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
50	30	30	5
100	60	60	10
150	90	90	15

As subparcelas foram constituídas de duas linhas duplas de um metro e meio de comprimento espaçadas de 1,4 x 0,30 metro, sendo as duas fileiras simples centrais consideradas úteis para efeito de coleta de dados e observações.

A adubação fosfatada, com uso de monoamônio fosfato granulado (45% P₂O₅ + 10% de N), foi totalmente realizada em fundação no dia anterior à semeadura. O fertilizante foi depositado em sulco centralizado em relação à fileira dupla de cultivo e com 0,10 m de profundidade. A adubação potássica e o restante da adubação nitrogenada foram divididos em três aplicações, entre a emergência das plantas e o estágio E3, sendo utilizados os fertilizantes cloreto de potássio solúvel (60% K₂O) e ureia (45% N), respectivamente. Ainda em E3, em toda a área experimental, foram aplicados 0,5 kg de Boro (H₃BO₃), 0,11 kg de sulfato de cobre (CuSO₄.5H₂O), 1,25 kg de sulfato de zinco (ZnSO₄.7H₂O) e 0,22 kg de sulfato de ferro quelatizado com ácido etilenodiamino tetra-acético (FeSO₄. 7H₂O + EDTA). Os fertilizantes em cobertura foram aplicados por meio do sistema de fertirrigação e injetados ao sistema por meio de tanque de derivação tipo “pulmão” (Figura 7).

Figura 7 – Injetor de fertilizante tipo tanque de derivação (pulmão).



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

3.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O preparo do solo, nas duas épocas avaliadas, consistiu em aração com grade aradora seguida de gradagem, ambas até 0,20 m. A semeadura foi realizada com semeadeira manual de rotor (Knapik), utilizando-se o dobro de sementes para assegurar a densidade desejada. (150.000 plantas ha⁻¹). O desbaste das plantas foi realizado quando elas estavam com 3 folhas totalmente expandidas. O manejo de plantas daninhas foi realizado manualmente, com enxada, até os 30 dias após a emergência das plantas de milho. Por fim, o controle fitossanitário foi feito segundo as recomendações para a cultura (AGROFIT, 2022).

Para a fertirrigação da cultura, foi utilizado sistema localizado, com uso de uma única fita gotejadora disposta centralizada em cada fileira dupla, com emissores espaçados em 0,20 m e vazão de 1,2 L h⁻¹. A água de irrigação era proveniente de poço artesiano com 100 metros de profundidade, apresentando 0,13 dS m⁻¹ de condutividade. O manejo da irrigação foi realizado pela estimativa de evapotranspiração da cultura, considerando-se a ETo calculada e o coeficiente de cultivo (Kc) proposto por Allen *et al.* (1998), de modo a manter a umidade do solo na fração de água prontamente disponível da cultura. O turno de rega foi ajustado pelo monitoramento da umidade do solo utilizando tensiômetro digital de punção nas parcelas que receberam o tratamento com fertilizantes NPK ao nível de 100% da recomendação de adubação (Figura 8).

Figura 8 – Uso de tensiômetro digital de punção para monitoramento da umidade do solo da área experimental



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

3.5 COLETA DE DADOS E ANÁLISES

Durante os dois ciclos avaliados, realizou-se a coleta de seis plantas representativas em cada área útil ao término de cada estágio fenológico, quando pelo menos 50% das plantas da subparcela atingiam o estágio correspondente. Foram avaliadas a produção de massa seca de caule, folhas, panícula e total, dependendo da fase fenológica da cultura.

As plantas colhidas em cada subparcela foram cortadas rente ao solo e transportadas, em feixes, para o Laboratório de Ciências Agrárias do Instituto Federal do Rio Grande do Norte, *Campus* Apodi, onde foram separadas em caule, folhas e panículas, dependendo do estágio fenológico. Posteriormente, as partes vegetais foram lavadas em água corrente e destilada, secas em estufa de circulação forçada, a 65 °C, até peso constante, para a determinação da matéria seca.

Os valores totais de matéria seca de cada parte da planta obtidos com as seis plantas colhidas em cada subparcela foram convertidos para megagrama por hectare, considerando-se a densidade de 150.000 plantas ha⁻¹. A matéria seca total da parte aérea das plantas na subparcela foi obtida com o somatório dos valores de matéria seca das partes (folha, caule e panícula).

As curvas de absorção de macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), na matéria seca, foram elaboradas apenas com as plantas provenientes das parcelas que receberam adubação NPK a 150% da dose recomendada. A escolha deste tratamento se justificou por demonstrar, consistentemente, os melhores resultados produtivos para ambas as cultivares. Essa abordagem permitiu caracterizar o padrão de absorção nutricional em condições de máxima produtividade, identificando as demandas nutricionais em cada fase de desenvolvimento das plantas. A escolha desse tratamento baseou-se no pressuposto de que, com 150% da adubação recomendada, as plantas expressariam todo seu potencial produtivo sem restrições nutricionais, servindo como referência para futuros estudos sobre as exigências nutricionais do milho.

As amostras das diferentes partes da planta obtidas em cada época de coleta do tratamento correspondente ao nível de adubação NPK em 150% foram separadas e moídas para a realização das determinações químicas dos teores de nutrientes. Para quantificação dos nutrientes, os acúmulos foram expressos em diferentes unidades conforme a classe de nutrientes: macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) foram convertidos para kg ha⁻¹, a partir dos teores determinados em g kg⁻¹ de matéria seca e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Zn) foram expressos em g ha⁻¹, calculados a partir dos teores obtidos em mg kg⁻¹ de matéria seca.

Através do extrato proveniente da digestão nítrico-perclórica ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$), foram determinados os teores de fósforo por espectrofotometria convencional, cálcio e magnésio por espectrofotometria de absorção atômica e potássio por fotometria de chama. Os teores de nitrogênio total foram determinados pelo método Kjeldahl, através da digestão sulfúrica da amostra (Malavolta *et al.*, 1997).

As avaliações de produtividade foram realizadas de forma específica para cada cultivar, considerando suas diferentes aptidões. Para a cultivar ANm 05, destinada à produção de grãos, determinou-se a produtividade na maturidade fisiológica (E9), mediante a colheita de todas as plantas nas áreas úteis das subparcelas. As panículas foram debulhadas e os grãos secos até atingirem 12% de umidade, com os resultados expressos em megagramas por hectare (Mg ha^{-1}). Já para a cultivar ANm 07, desenvolvida para produção de forragem, avaliou-se a biomassa fresca no estágio de enchimento de grãos (E7), coletando-se integralmente as plantas das áreas úteis e realizando a pesagem imediatamente após a coleta para evitar perdas por desidratação.

As datas de coleta representadas em dias após a semeadura foram transformadas em graus-dias acumulados (GDA) através da metodologia proposta por Ometto (1981) e de acordo com Pereira *et al.* (2002). Para isso, utilizou-se a fórmula $\text{GDA} = \Sigma (\text{temperatura média diária do ar} - \text{temperatura base})$ em $^{\circ}\text{C}$, por dia. A temperatura base utilizada foi de 10°C (Norman; Pearson; Searle, 1995).

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

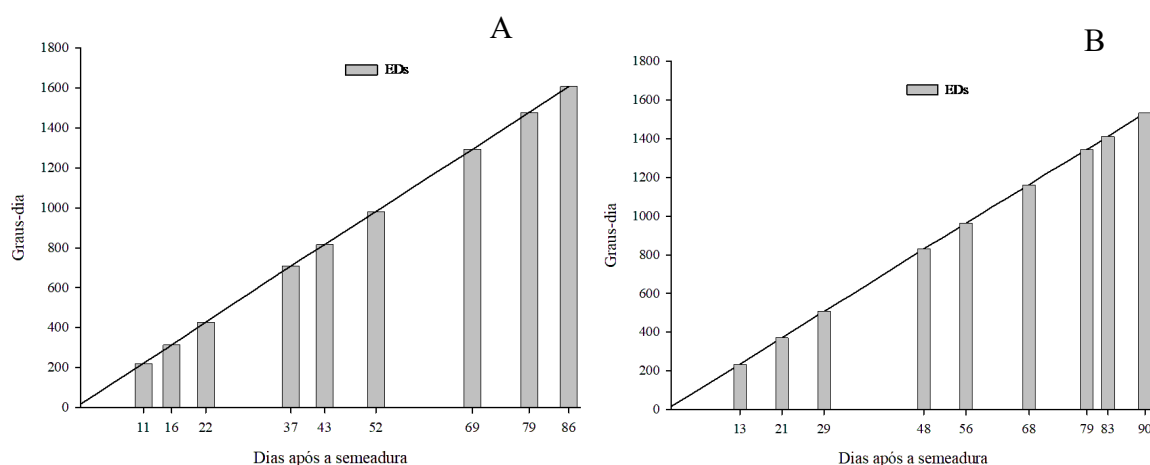
Os dados dos dois anos agrícolas foram submetidos à análise conjunta, após verificação da homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene ($p > 0,05$). A não-significância da interação (ano x tratamento) indicou que o comportamento dos tratamentos foi consistente entre os anos. Desta forma, os dados médios dos tratamentos foram submetidos à análise de variância e, para as diferenças significativas identificadas pelo teste F ($P < 0,05$), foram feitas análises de regressão, com o auxílio do programa estatístico R, versão 4.2.3, pacote “ExpDes.pt” (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021; R Core Team, 2023). Foram considerados os acúmulos de macronutrientes e de matéria seca como as variáveis dependentes e o acúmulo térmico (graus-dia), conforme os estádios fenológicos da cultura, a variável independente. Os modelos para ajuste das equações foram escolhidos com base no coeficiente de determinação e na sua significância. Os resultados gráficos foram construídos com auxílio do software SigmaPlot, versão 15.0 (SYSTAT SOFTWARE, INC).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DESEMPENHO PRODUTIVO

Para quantificar a disponibilidade de calor para o desenvolvimento da cultura, foi calculado o acúmulo de graus-dia (GD) diariamente, a partir de dados de temperatura média do ar. No ciclo de 2022 o monitoramento iniciou-se no dia da semeadura (estabelecido como 0 dias após a semeadura - DAS) e estendeu-se por um período total de 86 dias, cobrindo as principais fases fenológicas da planta, enquanto no ano ciclo de 2023, foi monitorado desde a semeadura até 90 dias após a semeadura. Os resultados do acúmulo de GD são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Acúmulo térmico ao longo do ciclo em 2022 (A) e 2023 (B)



Verificou-se, para o ciclo de 2022, uma progressão contínua e quase linear dos valores de GD acumulados ao longo do tempo. O acúmulo térmico inicial foi de 18,35 GD (0 DAS), atingindo 1.607,74 GD ao final do período de monitoramento (86 DAS). Isso representa um acréscimo total de 1.589,39 GD no intervalo. A análise da taxa de acúmulo revelou uma média de 18,65 GD/dia. Este valor demonstra a uniformidade das condições térmicas durante a condução do experimento, sem longos períodos de estresse por frio ou calor excessivo que pudessem alterar drasticamente a taxa de desenvolvimento da cultura. A curva de acúmulo (Figura 9A) mostra uma ligeira variação na taxa diária, o que é atribuído às flutuações naturais da temperatura ambiente entre os dias, mas sem desvios importantes que comprometam a previsibilidade do modelo térmico.

Para o ano de 2023, observou-se o valor inicial de 17,33 GD no dia da semeadura (0 DAS) aumentando consistente e quase linearmente ao longo do ciclo, atingindo 1.534,08 GD aos 90 DAS (Figura 9B). Este resultado representa um acréscimo total de 1.516,75 GD no período monitorado, abrangendo as principais fases fenológicas da cultura. A progressão dos dados demonstra uma curva de acúmulo contínua, sem interrupções ou platôs pronunciados, indicando a ausência de eventos climáticos extremos que pudessem interromper significativamente o desenvolvimento térmico da cultura.

Em comparação com o ano de 2022, o ciclo de 2023 foi caracterizado por um menor acúmulo térmico diário (16,85 GD/dia vs. 18,65 GD/dia em 2022). Essa diferença na taxa diária de GD reflete as condições térmicas médias mais amenas prevalecentes durante a estação de crescimento de 2023. Consequentemente, para atingir um estágio fenológico específico que demanda uma certa quantidade de GD, a cultura necessitou de mais dias cronológicos em 2023. Por exemplo, para atingir aproximadamente 1.100 GD, a cultura levou 60 DAS em 2023, enquanto no ano anterior esse mesmo patamar foi alcançado por volta de 58 DAS. Esta análise conjunta demonstra a importância do uso do grau-dia como unidade de medida biológica para padronizar e comparar o desenvolvimento de cultivos em diferentes condições climáticas.

O aumento dos níveis de adubação NPK e do acúmulo térmico influenciou positivamente a produção média de grãos do milho ANm 05, com dados ajustados por equações lineares (Figuras 10 e 11). O maior rendimento ocorreu com adubação a 150% e na maturidade fisiológica (E9).

Figura 10 – Produção de grãos de plantas de milho ANm 05, submetido à diferentes níveis de adubação NPK, considerando-se os valores médios obtidos nas distintas épocas de coleta

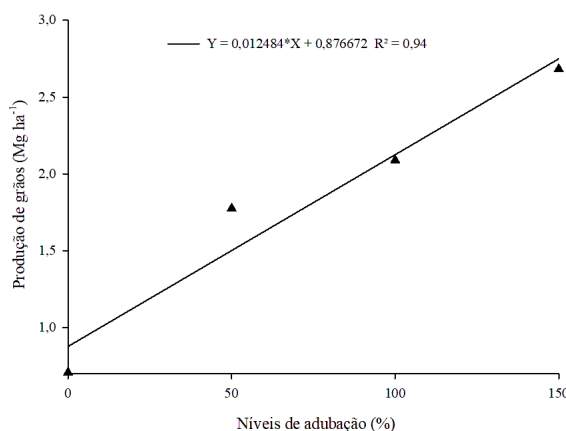
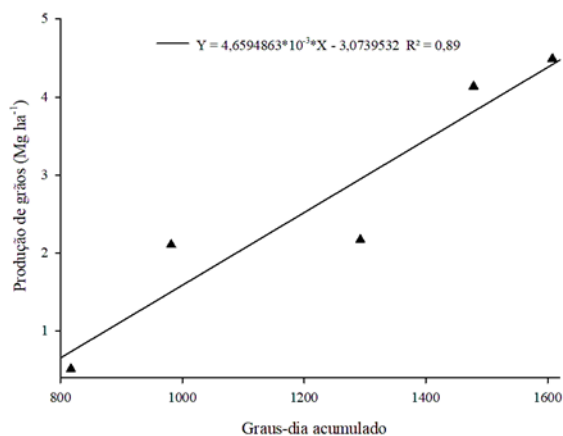


Figura 11 – Produção média de grãos de plantas de milho ANm 05, submetido à 150% da recomendação de adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



A produção de grãos do milho ANm 05, considerando os valores obtidos nas distintas épocas de coleta, aumentou de forma consistente com o incremento das doses de adubação NPK (Figura 4). Na ausência de adubação (0%), a produção foi de 0,87 Mg ha⁻¹. Com a aplicação de 50% da dose recomendada, a produtividade atingiu 1,50 Mg ha⁻¹, representando um incremento de 71% em relação à testemunha. Ao se utilizar 100% da adubação, a produção alcançou 2,12 Mg ha⁻¹, com um aumento adicional de 41% em relação à dose anterior. A máxima produtividade foi observada na dose de 150%, com 2,74 Mg ha⁻¹, correspondendo a um incremento de 29% sobre a dose de 100%. Esses resultados demonstram uma resposta positiva do milho à adubação, porém com eficiência decrescente nas doses mais elevadas. A dose de 150% proporcionou o maior rendimento absoluto, mas com menor eficiência de uso dos nutrientes em comparação com as doses intermediárias.

Desse modo, a resposta positiva do milho à adubação NPK está alinhada com os princípios fisiológicos de absorção e utilização de nutrientes em gramíneas. A produção média sem adubação (controle) reflete a baixa fertilidade natural do solo da área experimental. O incremento da produção com uso de 50% da dose recomendada demonstra a alta responsividade inicial da cultura à adubação, fenômeno atribuído à eficiência fotossintética potencializada pelo nitrogênio (Majerowicz *et al.*, 2002).

A desaceleração na taxa de resposta a partir da dose de 100% caracteriza o princípio dos incrementos decrescentes, onde a eficiência marginal de conversão nutricional diminui progressivamente (Fageria, 2000). A dose de 150%, apesar de proporcionar o máximo rendimento, apresentou menor eficiência agrônômica, indicando possível desequilíbrio nutricional ou estresse fisiológico.

Do ponto de vista fisiológico, as plantas atingem um limite máximo de capacidade metabólica para aproveitar os nutrientes adicionais, com saturação dos sistemas enzimáticos envolvidos na assimilação de nitrogênio, fósforo e potássio. Paralelamente, surgem desequilíbrios nutricionais, como o antagonismo entre potássio e magnésio ou a deficiência induzida de micronutrientes em decorrência de aplicações excessivas dos macronutrientes primários. O ambiente edáfico também impõe limitações, com perdas por lixiviação de nitratos em solos arenosos ou fixação de fósforo em solos ácidos, reduzindo a eficiência da adubação. Além disso, fatores como a capacidade de armazenamento de fotoassimilados nos grãos e a arquitetura da planta podem tornar-se limitantes em condições de alta disponibilidade nutricional (Lambers; Oliveira, 2019).

O milho ANm 05 submetido à adubação intensiva (150% da recomendação de NPK) apresentou uma dinâmica produtiva distinta em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico (Figura 5). Nos estágios iniciais (817–982 graus-dia), observou-se um crescimento exponencial na produção de grãos, com incremento de 311% (de 0,51 para 2,10 Mg ha⁻¹), correspondendo ao período de estabelecimento vegetativo e diferenciação de estruturas reprodutivas. Seguiu-se um período de relativa estabilização (982 - 1292 graus-dia) com apenas 3% de aumento produtivo (2,10 para 2,17 Mg ha⁻¹), possivelmente associado à fase crítica de florescimento e formação inicial dos grãos. A fase mais significativa ocorreu durante o enchimento dos grãos (1292 - 1608 graus-dia), particularmente no intervalo entre 1292–1478 graus-dia, quando se concentrou 65% do acúmulo final, com a produção saltando de 2,17 para 4,14 Mg ha⁻¹. O rendimento máximo de 4,49 Mg ha⁻¹ foi alcançado aos 1607,74 graus-dia, marcando a maturação fisiológica.

A análise da eficiência térmica revelou variações importantes, com pico de 0,0063 Mg ha⁻¹/grau-dia no período de 1292 a 1478 graus-dia, contrastando com apenas 0,0002 Mg ha⁻¹/grau-dia na fase de estabilização. Estes resultados destacam a existência de janelas críticas termo-dependentes para o manejo da cultura, particularmente entre 1300 - 1500 graus-dia, quando a planta demonstra maior capacidade de conversão de recursos em produção de grãos sob condições de alta disponibilidade nutricional. A resposta observada sugere que o potencial produtivo do milho ANm 05 em sistemas intensivos está intimamente vinculado à sincronia entre o suprimento nutricional elevado e o atendimento das demandas térmicas específicas em cada fase fenológica.

O índice de colheita (IC) obtido neste estudo foi de 14,72%, valor que está na faixa reportada por Carberry, Campbell e Bidinger (1985) para variedades de milho de polinização aberta, que tradicionalmente apresenta IC reduzido, variando entre 15 e 20%. Este fenômeno

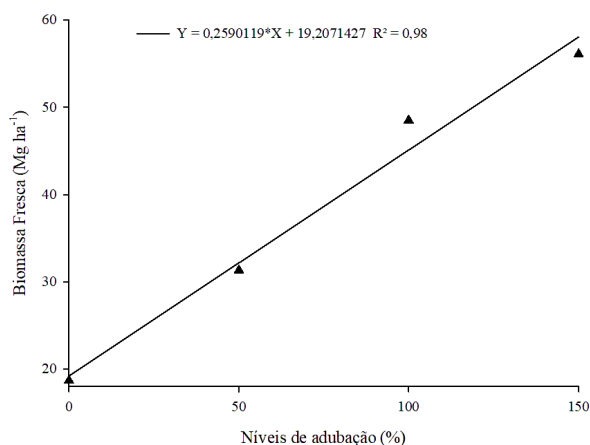
pode ser atribuído à maior alocação de biomassa para estruturas vegetativas em detrimento dos grãos e às limitações no processo de enchimento de grãos relacionadas à capacidade de dreno da planta (Zhou *et al.*, 2020).

Kassam e Kowal (1975) encontraram rendimentos de 3,828 kg ha⁻¹ de grãos em uma variedade de milheto de polinização aberta (IC = 16,99%). Rachie e Majmudar (1980) relataram rendimentos de grãos superiores a 5 Mg ha⁻¹ em um híbrido de milheto semianão aos 85 DAE. Geraldo *et al.* (2000), comparando materiais nacionais e africanos, em solo corrigido e adubado, obtiveram uma produção de grãos de 4,0 Mg ha⁻¹, com as cultivares africanas, enquanto as brasileiras produziram em média apenas 2,68 Mg ha⁻¹.

A relação linear observada entre acumulação térmica e produtividade, associada ao baixo IC, sugere haver potencial para melhorias no manejo da cultura e no melhoramento genético visando aumentar a eficiência de produção.

Quanto à biomassa fresca no milheto ANm 07 (Figura 12), os dados demonstram uma resposta linear positiva da biomassa à adubação NPK, com incrementos consistentes em função do aumento das doses de fertilizante. A produção variou de 19,20 Mg ha⁻¹ no tratamento sem adubação (0% NPK) até 58,05 Mg ha⁻¹ na dose máxima (150% NPK), representando um aumento de 202% na biomassa fresca total.

Figura 12 – Produção de biomassa fresca total da parte aérea de plantas de milheto ANm 07 submetido à diferentes níveis de adubação NPK



Observa-se um padrão de incremento proporcional, onde cada elevação de 50% na dose de NPK resultou em ganhos médios de aproximadamente 13 Mg ha⁻¹ de biomassa fresca. Especificamente, a adubação a 50% proporcionou 32,15 Mg ha⁻¹ (67% de aumento em relação à testemunha), enquanto as doses de 100% e 150% alcançaram 45,10 Mg ha⁻¹ (+135%) e 58,05

Mg ha⁻¹ (+202%), respectivamente. Esta resposta linear sugere que, na faixa testada (0 - 150% NPK), a cultura não atingiu o platô de máxima resposta à adubação, indicando potencial para maiores produções com doses ainda superiores.

Do ponto de vista do manejo nutricional, estes resultados destacam a importância da adubação balanceada para o milho ANm 07 (Figura 12), particularmente em sistemas que visam alta produção de biomassa. A relação direta entre dose e produção sugere que a cultura apresenta alta capacidade de conversão de nutrientes em biomassa fresca, embora seja recomendável avaliar a relação custo-benefício em doses superiores a 100% NPK, considerando a lei dos rendimentos decrescentes (Beltayef *et al.*, 2020).

4.2 ACÚMULO DE MATÉRIA SECA

O aumento das doses de adubação NPK e o acúmulo térmico ao longo do ciclo da cultura, nas condições testadas, influenciaram significativamente, conforme o teste F ($P < 0,01$), o acúmulo de matéria seca total (AcMS) da parte aérea das cultivares de milho. Observou-se efeito para a interação entre as doses e o acúmulo térmico para estas variáveis. Não se observou efeito significativo com relação à utilização dos blocos (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para o acúmulo de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)

FV	GL		Quadrados Médios	
	ANm 05	ANm 07	ANm 05	ANm 07
Bloco	3	3	0,1685 ^{ns}	2,473658 ^{ns}
Doses	3	3	750,9379**	158,711651**
Erro 1	9	9	2,2372	0,731701
GDA	8	6	1163,6967**	554,189194**
Doses x GDA	24	18	64,0779**	21,063005**
Erro 2	96	72	1,6213	0,626423
Total	143	111		
CV 1 (%)	15,00	13,60		
CV 2 (%)	12,77	12,58		

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; GDA – Graus-dia acumulado; CV (%) – Coeficiente de variação.

Os valores médios de acúmulo de matéria seca total da parte aérea do milho ANm 05 apresentaram variações significativas em função das doses de adubação NPK e dos estádios de desenvolvimento, conforme demonstrado pelos resultados estatísticos (Anexo A). Observou-se

um padrão crescente de produção de biomassa ao longo do ciclo da cultura, iniciando com valores entre 0,30 e 2,16 Mg ha⁻¹ nos estádios vegetativos iniciais (E1 a E3) e atingindo máximos de 8,05 a 30,45 Mg ha⁻¹ no estágio de maturação fisiológica (E9), dependendo da dose aplicada. A análise estatística revelou que as doses de 100% e 150% de NPK proporcionaram os maiores acúmulos de matéria seca na maioria dos estádios, com destaque para a dose de 150% que alcançou 30,45 Mg ha⁻¹ no estágio E9, valor significativamente superior às demais doses testadas.

A resposta à adubação mostrou-se mais pronunciada a partir do estágio E4, com diferenças marcantes entre as doses, enquanto nos estádios iniciais (E1-E3) as variações foram menos expressivas. A maior eficiência da adubação foi observada nos estádios reprodutivos (E6 - E8), onde a dose de 150% superou a testemunha em até 347% no estágio E7. Contudo, vale ressaltar que em vários estádios não houve diferença significativa entre as doses de 100% e 150%, sugerindo possível saturação na resposta aos nutrientes nas doses mais elevadas. Esses resultados indicam que o manejo da adubação do milho ANm 05 deve considerar tanto a fase fenológica da cultura quanto a relação custo-benefício das doses aplicadas, com possibilidade de obtenção de bons resultados com doses moderadas em muitos casos.

Segundo Marcelo, Corá e Fernandes, 2012 (2012), as taxas de acumulação de matéria seca durante o primeiro estágio de desenvolvimento (E1) são baixas, face à pequena área foliar da planta. Nessa fase, a maior parte da matéria seca produzida vem das folhas e raízes. O crescimento foliar continua durante o segundo estágio de desenvolvimento (E2), com o primeiro broto principal, e então os perfilhos expandem suas folhas.

Conforme Rodrigues *et al.* (2012), nas folhas de plantas de milho, o acúmulo de matéria seca é relativamente lento no início do desenvolvimento vegetativo. Todavia, após este período, ocorre incremento considerável na acumulação de matéria seca, sendo máxima no florescimento. Durante o estágio de desenvolvimento E3 observa-se um maior aumento na matéria seca da planta na panícula, uma vez que os perfilhos atingem o florescimento e os grãos cheios em todas as panículas. A partição final de matéria seca na folha, colmo e panícula variam amplamente em milho, dependendo da variedade. Nas variedades de porte anãs, de alta produtividade, 50% da matéria seca deve estar particionada nas panículas, com o restante alocado entre os colmos e as folhas, em razão de aproximadamente 3:1.

Costa *et al.* (2020), ao avaliar o desempenho fisiológico e produtivo do milho sob diferentes doses e fontes de nitrogênio, em condições de pleno sol em Redenção-CE, concluíram que altas doses de N afetam o ciclo de produção da cultura. Ademais, estes autores, ao testar cinco doses de nitrogênio (50%; 75%; 100%; 125% e 150% da recomendação de N

para o milheto), observaram que o uso de dose de N de 63% da recomendação proporciona a maior taxa de assimilação de CO₂ e condutância estomática.

Quanto ao padrão de desenvolvimento, os intervalos de tempo específicos entre os estádios fenológicos podem variar entre os diversos cultivares. Com isso, cultivares de milheto podem florescer mais cedo ou mais tarde, além de desenvolver maior ou menor número de folhas (Santos *et al.*, 2018). No presente trabalho, a interação entre doses e acúmulo térmico (AcMS) relaciona-se à resposta positiva da adubação sobre a velocidade de desenvolvimento, o que pode ter influenciado o intervalo de aparecimento entre os estádios sob diferentes níveis de adubação.

Em relação aos valores médios de acúmulo de matéria seca do milheto forrageiro ANm 07 os dados comprovaram uma clara diferenciação em resposta às doses de adubação NPK ao longo dos estádios de desenvolvimento (Anexo B). Nos estádios iniciais (E1 a E3), não foram observadas diferenças significativas entre as doses, com valores variando entre 0,011 e 0,96 Mg ha⁻¹, indicando que neste período inicial a cultura apresenta baixa demanda por nutrientes. A partir do estágio E4, começam a surgir diferenças marcantes entre os tratamentos, com a dose de 150% de NPK apresentando consistentemente os maiores valores de matéria seca em todos os estádios subsequentes.

A resposta à adubação tornou-se mais evidente nos estádios finais de desenvolvimento, particularmente no estágio E7, onde a dose máxima (150% NPK) proporcionou 18,00 Mg ha⁻¹ de matéria seca, significativamente superior aos 10,85 Mg ha⁻¹ obtidos sem adubação. Contudo, é importante destacar que a dose de 100% NPK apresentou desempenho satisfatório, alcançando 14,96 Mg ha⁻¹ no estágio E7, valor estatisticamente semelhante à dose mais elevada em vários estádios intermediários.

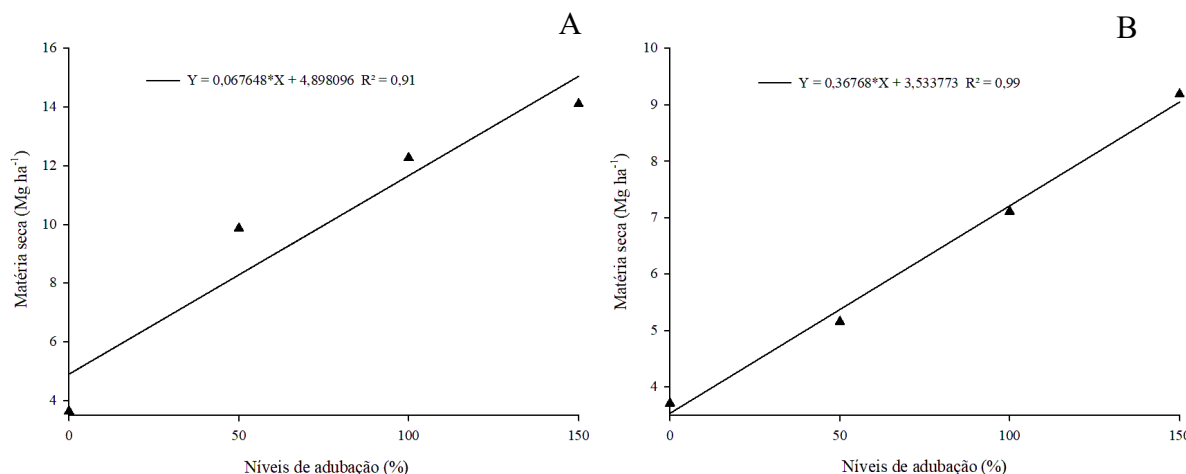
O padrão de crescimento demonstrou uma curva sigmoideal, com aumento gradual da matéria seca até o estágio E7, sendo mais acentuado entre os estádios E4 e E6. A maior eficiência da adubação foi observada nos estádios E5 a E7, onde a dose de 150% superou a testemunha em até 208% (E5). Estes resultados sugerem que o manejo nutricional do milheto ANm 07 deve priorizar aplicações mais intensivas a partir do estágio E4, quando a cultura demonstra maior capacidade de conversão dos nutrientes em biomassa.

O acúmulo médio de matéria seca total da parte aérea dos genótipos de milheto ANm 05 e ANm 07 apresentou respostas distintas aos níveis de adubação NPK, revelando características fisiológicas e adaptativas específicas para cada material.

O genótipo ANm 05 demonstrou maior responsividade à adubação, com incremento de 288% na produção de matéria seca (de 3,63 para 14,11 Mg ha⁻¹) quando submetido à dose

máxima de 150% NPK, seguindo um padrão de resposta típico de variedades melhoradas com alta plasticidade fenotípica (Figura 13A). Este comportamento sugere uma eficiente conversão dos nutrientes aplicados em biomassa, com eficiência agrônômica de 0,070 Mg de MS por unidade percentual de NPK aplicada.

Figura 13 – Acúmulo médio de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido a diferentes níveis de adubação NPK

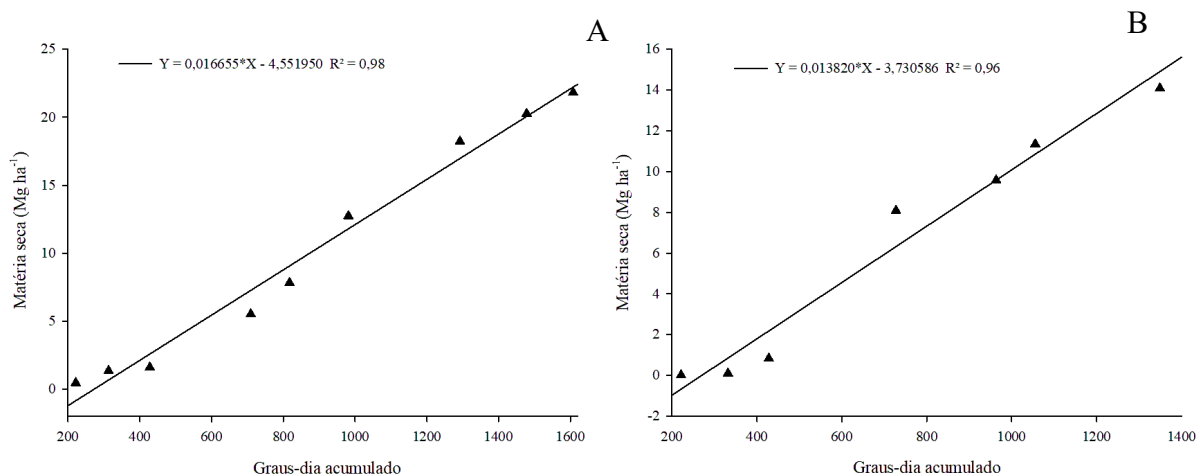


O acúmulo de matéria seca do milho ANm 07 apresentou uma resposta linear significativa às doses de adubação NPK, com aumento progressivo de 3,71 Mg ha⁻¹ (0% NPK) para 9,19 Mg ha⁻¹ (150% NPK), representando um incremento de 148% (Figura 13B). A análise dos dados revela um padrão consistente de acúmulo, com ganhos médios de aproximadamente 1,83 Mg ha⁻¹ a cada incremento de 50% na dose de fertilizante. Essa resposta linear sugere que, mesmo na dose máxima de 150% NPK não foi atingido o platô de máxima produção, indicando potencial para maiores produtividades com doses ainda superiores.

Diversos estudos demonstram o efeito positivo do aumento da adubação sobre o acúmulo de matéria seca (AcMS) na parte aérea do milho (Foloni *et al.*, 2016; Fonteles, 2018; Nicolau Sobrinho *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2021; Vilela, 2012). Jornada *et al.* (2005) também verificaram incremento nos rendimentos com doses de N de 0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹, obtendo respectivamente 9.232, 10.649, 12.334 e 12.681 kg de MS ha⁻¹.

Para o AcMS, em função do acúmulo térmico, observou alta correlação positiva linear, culminando com maiores valores de AcMS ao final do ciclo. (Figura 14). Para a cultivar ANm 05 (Figura 14A), na média das doses de adubação aplicadas, obteve-se 21,82 Mg AcMS ha⁻¹ aos 1607 graus-dia, o que correspondeu, para as condições climáticas do período experimental, a 86 dias de crescimento após a semeadura (DAS), mesmo ciclo encontrado por Scheffer-Basso, Agranionik e Fontaneli (2004).

Figura 14 – Produção de matéria seca total da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido a diferentes níveis de adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



A produção de matéria seca total da parte aérea do milho ANm 07 em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico (Figura 14B) apresenta um padrão de crescimento linear típico de culturas anuais, com três fases distintas: uma fase inicial lenta, uma fase intermediária de crescimento acelerado e uma fase final de estabilização. Nos primeiros estádios, com acúmulo térmico entre 221 e 428 graus-dia, a produção de biomassa é reduzida ($0,015$ a $0,83 \text{ Mg ha}^{-1}$), refletindo o estabelecimento das plantas e o desenvolvimento inicial das folhas. A partir de 428 graus-dia, observa-se uma aceleração exponencial no acúmulo de biomassa, atingindo $8,08 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 727 graus-dia e $11,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 1056 graus-dia, período que corresponde às fases de alongamento do colmo e expansão foliar máxima. A fase final, acima de 1056 graus-dia, mostra uma desaceleração no acúmulo, com a produção atingindo $14,09 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 1349 graus-dia (E7).

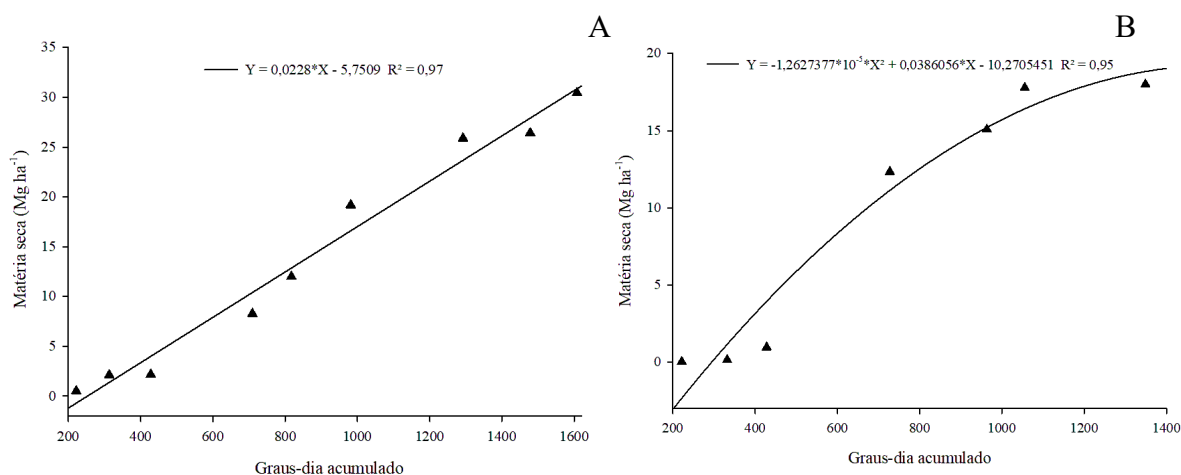
Essa curva de crescimento evidencia a forte dependência térmica do desenvolvimento do milho, sendo o período entre 428 e 1056 graus-dia o mais crítico para o manejo da adubação, uma vez que pequenas variações no acúmulo térmico nessa fase resultam em grandes diferenças na produção final. A estabilização da curva próximo aos 14 Mg ha^{-1} sugere que esse genótipo atinge seu potencial máximo de produção de matéria seca nessa condição de cultivo, sendo necessário avaliar se o platô é determinado pelo limite genético ou por fatores ambientais, como disponibilidade hídrica ou nutrientes.

Este comportamento de resposta linear do AcMS das cultivares em função do acúmulo térmico é semelhante àquele observado por Scheffer-Basso, Agranionik e Fontaneli (2004), que avaliaram o acúmulo de biomassa e composição bromatológica entre os milhetos cv. Africano e cv. Comum na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Contudo, estes autores

encontraram AcMS de 13 Mg ha⁻¹ aos 1023 graus-dia, valores que destoam do presente trabalho.

O modelo de regressão linear demonstrou um ajuste significativo para o acúmulo total de matéria seca da parte aérea (AcMS) do milho granífero ANm 05 cultivado sob 150% da dose recomendada de adubação NPK, em resposta ao acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico (Figura 15A). Sob as condições experimentais adotadas (manejo fertirrigado, arranjo espacial, densidade populacional e clima controlado), observou-se que o ponto de máxima produtividade (30,45 Mg ha⁻¹ de AcMS) foi alcançado aos 1607 graus-dia, correspondendo ao estágio fenológico E9 (maturidade fisiológica).

Figura 15 – Acúmulo total de matéria seca da parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A), e ANm 07 (B), submetido à 150% da adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



Esse desempenho excepcional superou os valores reportados na literatura para a cultura do milho, destacando o elevado potencial produtivo do genótipo ANm 05 quando submetido a um manejo nutricional otimizado e condições edafoclimáticas favoráveis. O resultado reforça a importância da interação entre genótipo, ambiente e manejo para maximizar a produtividade em sistemas agrícolas intensivos, especialmente em regiões com alta disponibilidade de radiação solar e suplementação hídrica via fertirrigação.

Além disso, a resposta linear entre acúmulo térmico e produção de biomassa sugere que, nas condições avaliadas, não houve limitação fisiológica ou ambiental durante o ciclo, permitindo que a cultura expressasse seu potencial genético pleno. Esse comportamento contrasta com modelos sigmoidais usuais, nos quais a taxa de crescimento diminui em fases avançadas, indicando que o milho ANm 05, sob alta disponibilidade de nutrientes e água, mantém eficiência no acúmulo de matéria seca até a maturidade (Singh *et al.*, 2016). Portanto, o estudo evidencia que a combinação de um genótipo adaptado, adubação elevada e manejo

preciso da fertirrigação pode elevar significativamente a produtividade do milho granífero, abrindo perspectivas para a intensificação sustentável em regiões semiáridas.

O acúmulo de matéria seca (MS) da parte aérea do milho ANm 07 cultivado sob adubação NPK elevada (150% da recomendação), em função do acúmulo térmico, apresentou uma dinâmica de crescimento caracterizada por três fases distintas (Figura 9B). Na fase inicial (221-428 graus-dia), a produção de biomassa foi reduzida (0,02-0,96 Mg ha⁻¹), comportamento típico da fase de estabelecimento da cultura, onde os recursos fotossintéticos são prioritariamente alocados para o desenvolvimento radicular e folhas jovens.

A fase de crescimento acelerado (428-1056 graus-dia) demonstrou aumento exponencial na produção de MS, atingindo 17,78 Mg ha⁻¹ aos 1056 graus-dia. Esse incremento expressivo (17,8 vezes maior que o período anterior) reflete a eficiência da adubação elevada em suprir as demandas nutricionais durante o período vegetativo crítico.

Na fase final de desenvolvimento (1056-1349 graus-dia), a produção de biomassa do milho estabilizou-se em 18,00 Mg ha⁻¹, padrão que corrobora os resultados de Moraes *et al.* (2004). Esses autores observaram uma desaceleração no acúmulo de matéria seca a partir dos 75 dias após o plantio, com valor máximo de 10,3 Mg ha⁻¹ aos 90 dias, indicando uma tendência de platô no crescimento em estágios tardios. Essa estabilização sugere que a adubação elevada (150% NPK) permitiu que a cultivar ANm 07 mantivesse sua atividade fotossintética até a maturação fisiológica completa, sem os sinais de senescência precoce comumente observados em condições de menor disponibilidade nutricional (Carvalho *et al.*, 2019).

A resposta exponencial observada até 1056 graus-dia indica que a adubação elevada foi eficiente em prolongar o período de crescimento ativo, possivelmente pela manutenção da taxa fotossintética foliar e do balanço hormonal favorável ao desenvolvimento vegetativo (Palchetti *et al.*, 2023). A estabilização da produção a partir de 1056 graus-dia, sem declínio, sugere que o potencial genético da cultivar foi plenamente expresso, sem limitações por estresse nutricional ou hídrico. Esses resultados reforçam a importância do manejo nutricional intensivo para maximizar a produtividade do milho em sistemas agrícolas de alta eficiência, particularmente em regiões com alta disponibilidade térmica como o semiárido brasileiro.

4.3 ACÚMULO DE MACRONUTRIENTES

Para o acúmulo total dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg na parte aérea de plantas de milho granífero, cultivar ANm 05, observou-se efeito significativo ($P < 0,01$) em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado) (Tabela 6). Com isso, valores estimados

dos conteúdos de macronutrientes acumulados na parte aérea da planta de milho granífero podem ser previstos, através do ajuste a equações polinomiais, em função do acúmulo térmico. Considerando o acúmulo médio entre os estádios fenológicos, observou-se extração média de 128,80, 19,38, 140,61, 68,29 e 44,55 kg ha⁻¹ para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de macronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 05, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)

FV	GL	Quadrados Médios				
		N	P	K	Ca	Mg
Bloco	3	427,65 ^{ns}	10,41 ^{ns}	471,84 ^{ns}	40,01 ^{ns}	6,65 ^{ns}
GDA	8	28826,93 ^{**}	687,26 ^{**}	35827,21 ^{**}	11305,03 ^{**}	5140,32 ^{**}
Erro	24	827,75	6,76	698,21	110,05	43,80
Média		128,80	19,38	140,61	68,29	44,55
CV (%)		22,34	13,42	18,79	15,36	14,85

^{**} - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; GDA – Graus-dia acumulado; CV (%) – Coeficiente de variação.

Segundo Rodrigues *et al.* (2012), a absorção de nutrientes no início do ciclo da cultura do milho é baixa. Nas primeiras semanas após a semeadura, quase não há absorção de nutrientes do solo. Após este período inicial, diferenças na absorção e acúmulo de nutrientes começam a surgir, devido a fatores intrínsecos e extrínsecos à planta.

A análise de variância para o acúmulo de macronutrientes na parte aérea do milho granífero ANm 07 revelou padrões importantes sobre a dinâmica nutricional da cultura ao longo de seu desenvolvimento fenológico (Tabela 9). Os resultados demonstraram efeito altamente significativo ($p < 0,01$) dos graus-dia acumulados (GDA) sobre o acúmulo de todos os macronutrientes avaliados (N, P, K, Ca e Mg), indicando uma relação direta entre o estágio de desenvolvimento da planta e suas demandas nutricionais. O potássio (K) apresentou a maior variação entre estádios, seguido pelo nitrogênio (N), refletindo o papel central desses elementos nos processos fisiológicos da planta, como a translocação de fotoassimilados e a síntese de compostos nitrogenados. O efeito de blocos não foi significativo para nenhum dos nutrientes, confirmando a homogeneidade das condições experimentais.

Tabela 7 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de macronutrientes na parte aérea de plantas de milho granífero ANm 07, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)

FV	GL	Quadrados Médios				
		N	P	K	Ca	Mg
Bloco	3	697,52 ^{ns}	6,51 ^{ns}	2229,41 ^{ns}	183,36 ^{ns}	11,23 ^{ns}
GDA	6	47294,19 ^{**}	755,75 ^{**}	96711,40 ^{**}	19181,16 ^{**}	1183,00 [*]
Erro	18	1048,63	3,40	780,87	96,38	9,67
Média		121,23	15,46	171,05	61,61	16,70
CV (%)		26,71	11,93	16,34	15,93	18,62

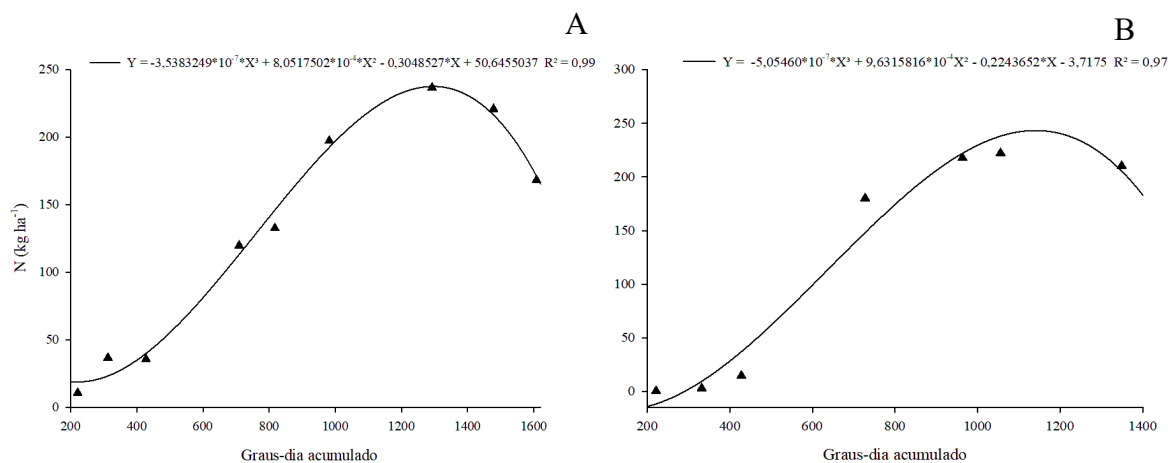
^{**} - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; GDA – Graus-dia acumulado; CV (%) – Coeficiente de variação.

As médias gerais de acúmulo (kg ha⁻¹) mostraram que K (171,05) e N (121,23) foram os nutrientes mais acumulados, enquanto P (15,46) e Mg (16,70) apresentaram menores quantidades, porém ainda com acúmulo significativo ao longo do ciclo.

Estes resultados estão em concordância com estudos anteriores que destacam o potássio e o nitrogênio como os nutrientes mais demandados pelo milho (Silva *et al.*, 2010), particularmente nas fases de crescimento vegetativo ativo e reprodução. A significância dos graus-dia acumulados corrobora com o trabalho de Costa *et al.* (2005), que relacionam o acúmulo térmico com o aumento progressivo na demanda por nutrientes até o estágio reprodutivo. Do ponto de vista agrônomo, estes achados reforçam a necessidade de manejo nutricional diferenciado ao longo do ciclo da cultura, com ênfase na suplementação de K e N durante as fases de maior crescimento vegetativo e alocação de biomassa.

As plantas de milho das cultivares ANm 05 e ANm 07 apresentaram o nitrogênio como o segundo macronutriente mais extraído, conforme demonstrado na Figura 16. A dinâmica de extração de N em função do acúmulo térmico exibiu um padrão sigmoidal característico, com valores máximos de 237,72 kg ha⁻¹ atingidos aos 1295 graus-dia para a ANm 05 e 243,36 kg ha⁻¹ aos 1140 graus-dia para a ANm 07. Esta curva de acúmulo não linear pode ser atribuída ao progressivo declínio nos teores de N na matéria seca da parte aérea ao longo do ciclo fenológico, fenômeno resultante do efeito de diluição nutricional. Esse processo ocorre quando a taxa de acúmulo de matéria seca supera a capacidade de absorção e translocação de N pela planta, levando à redução relativa na concentração desse nutriente nos tecidos vegetais (Matos *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2010).

Figura 16 – Acúmulo total de nitrogênio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico

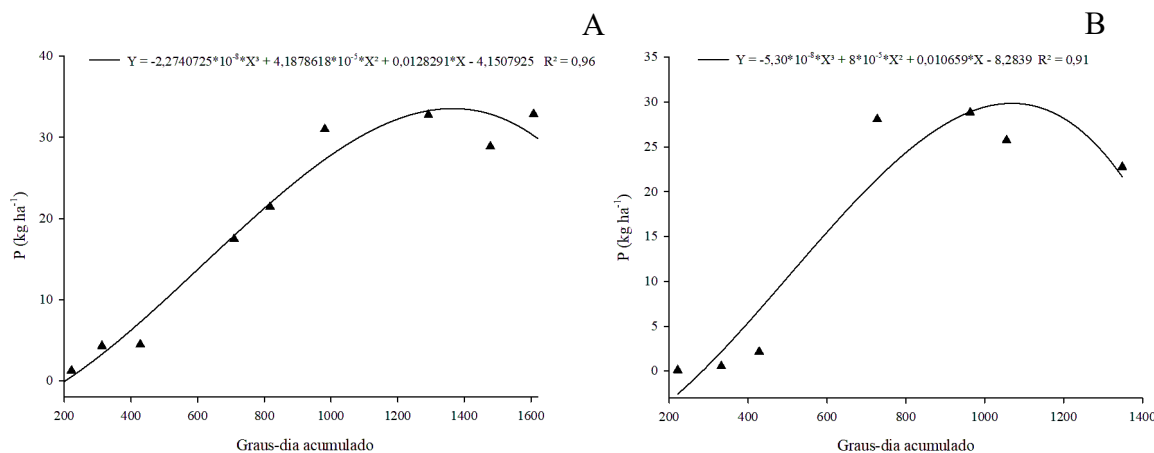


Os resultados obtidos no presente estudo demonstraram-se consistentes com os padrões relatados por Matos *et al.* (2005) e Silva *et al.* (2010) para cultivos de milho, porém superaram significativamente os valores observados por Rodrigues *et al.* (2012). As diferenças entre as cultivares ficaram evidentes tanto no tempo necessário para atingir o máximo acúmulo quanto nos teores finais de N acumulado, sugerindo variações genéticas na eficiência de uso desse nutriente. O comportamento sigmoidal da curva reforça a importância do manejo nutricional adequado nas fases iniciais do desenvolvimento, quando a planta estabelece sua capacidade fotossintética e demanda quantidades crescentes de nitrogênio para sustentar o crescimento vegetativo.

A comparação com a literatura indica que os níveis de acúmulo alcançados neste trabalho representam um avanço significativo na produtividade nutricional do milho, possivelmente associado às condições otimizadas de cultivo e às características específicas das cultivares estudadas. Esses achados corroboram a premissa de que o manejo adequado da adubação nitrogenada, sincronizado com as demandas fenológicas da planta, pode maximizar a eficiência de uso desse nutriente (Silva *et al.*, 2010), ao mesmo tempo, em que destacam a necessidade de considerar as particularidades de cada material genético no planejamento das estratégias de fertirrigação.

O fósforo (P) é o macronutriente com menor demanda pelas cultivares de milho ANm 05 e ANm 07 (Figura 17). A dinâmica de absorção deste nutriente apresentou um padrão quadrático característico, com picos de acúmulo de 33,55 kg ha⁻¹ aos 1365 graus-dia para a ANm 05 e 29,78 kg ha⁻¹ aos 1069 graus-dia para a ANm 07. Esses valores se encontram em consonância com os resultados reportados por Matos *et al.* (2005) e Moraes *et al.* (2008) para a cultura do milho.

Figura 17 – Acúmulo total de fósforo na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico

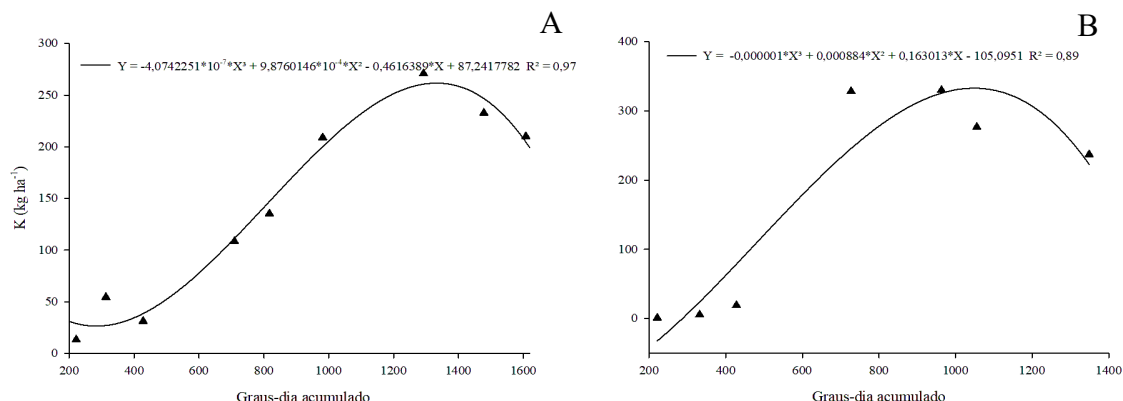


O estudo revelou uma redução progressiva nos teores de P na matéria seca da parte aérea em função do acúmulo térmico, fenômeno que explica satisfatoriamente o comportamento da curva de extração observada. Esta diminuição na concentração de P pode ser atribuída ao efeito combinado de dois fatores principais: (1) o aumento exponencial da produção de matéria seca durante as fases avançadas do ciclo fenológico, que dilui a concentração do nutriente nos tecidos vegetais (López-Arredondo *et al.*, 2014); e (2) a possível redistribuição do fósforo para os órgãos reprodutivos, processo comum em gramíneas durante a fase de enchimento de grãos (Menezes-Blackburn *et al.*, 2017)

Apesar da menor exigência geral de fósforo pelo milho em comparação com outros macronutrientes - fato corroborado pela literatura (Matos *et al.*, 2005; Moraes *et al.*, 2008) - os resultados destacam a necessidade de ajustes no manejo da adubação fosfatada conforme o ciclo de cada cultivar. Para a ANm 07, com ciclo mais curto, a disponibilidade de P deve ser garantida principalmente nas fases iniciais até o florescimento, enquanto para a ANm 05, de ciclo mais longo, a manutenção da disponibilidade do nutriente se mostra necessária até estádios mais tardios, visando atender sua demanda nutricional prolongada. Essa distinção é particularmente relevante considerando o papel fundamental do fósforo nos processos energéticos e de transferência de energia nas plantas.

O potássio (K) destacou-se como o macronutriente de maior demanda pelas plantas de milho, apresentando padrão de acúmulo não linear em função do acúmulo térmico (Figura 18). A cultivar ANm 05 atingiu seu pico máximo de extração ($259,53 \text{ kg ha}^{-1}$) aos 1389 graus-dia, enquanto a ANm 07 alcançou acúmulo superior ($332,93 \text{ kg ha}^{-1}$) em estágio fenológico mais precoce (1048 graus-dia), resultados consistentes com Oliveira *et al.* (2002).

Figura 18 – Acúmulo total de potássio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico

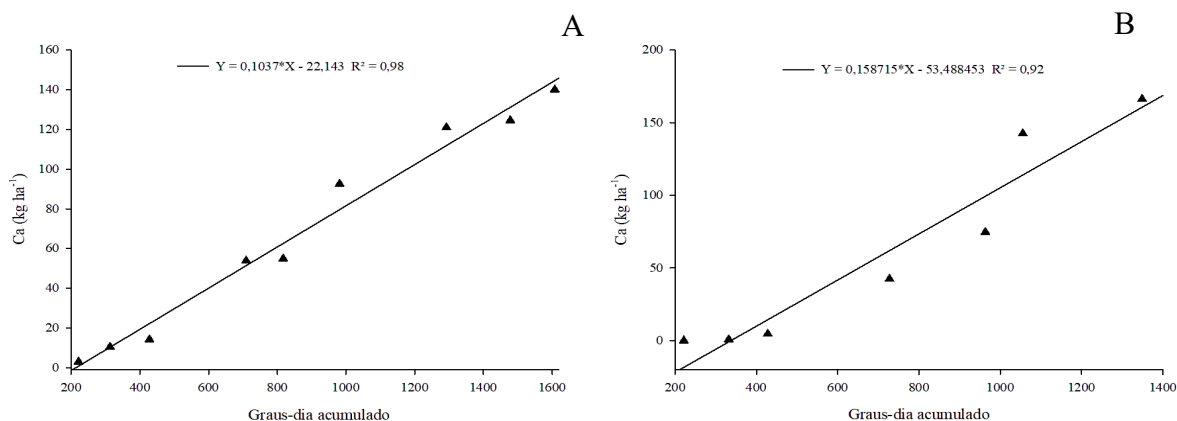


A redução progressiva nos incrementos de acúmulo de K após os pontos de máxima extração pode ser atribuída a três fatores principais: (1) o processo de redistribuição fisiológica do nutriente para os órgãos reprodutivos durante a fase de enchimento de grãos, conforme descrito por Marschner (1995); (2) a diminuição natural da atividade radicular em estádios avançados do ciclo, limitando a absorção de nutrientes (Taiz; Zeiger, 2004); e (3) o efeito de diluição na matéria seca, onde o aumento acelerado da biomassa vegetal supera a capacidade de absorção do nutriente (Jarrell; Beverly, 1981).

Particularmente na cultivar ANm 07, que atingiu o pico em menor acúmulo térmico, a antecipação do declínio pode estar associada ao seu ciclo fenológico mais curto, que concentra a demanda nutricional nas fases vegetativas e de florescimento. Já na ANm 05, a manutenção de taxas elevadas por mais tempo reflete sua maior duração de ciclo até a maturação fisiológica.

O acúmulo de cálcio (Ca) pelo milho apresentou um padrão linear positivo em resposta ao acúmulo térmico, com diferenças significativas entre os tipos de milho granífero e milho forrageiro (Figura 19).

Figura 19 – Acúmulo total de cálcio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico

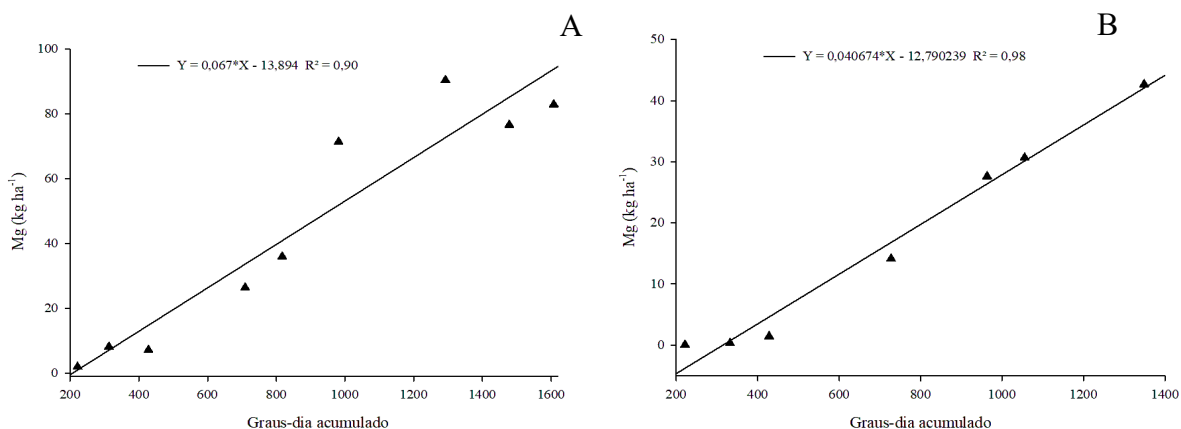


Esse comportamento linear de acúmulo pode ser explicado pelo papel estrutural do cálcio na formação da lamela média e na estabilização de membranas celulares (Taiz; Zeiger, 2004), processos contínuos durante todo o desenvolvimento vegetativo. Diferentemente de nutrientes móveis como N e K, o Ca apresenta baixa redistribuição via floema (Marschner, 1995), justificando a ausência de platô na curva de absorção. A maior demanda pelo milho forrageiro pode estar relacionada à necessidade de manter a integridade estrutural para suportar múltiplos cortes, enquanto no graminífero o Ca é essencial para o desenvolvimento do sistema radicular e estabilidade do colmo durante o enchimento de grãos.

A similaridade entre a marcha de absorção de Ca e o acúmulo de matéria seca corrobora estudos como os de Fancelli e Dourado-Neto (2000), que descrevem a relação direta entre crescimento vegetativo e demanda por Ca. Os resultados superiores aos da literatura podem ser atribuídos a fatores como a maior eficiência das cultivares modernas na absorção de Ca, condições edafoclimáticas mais favoráveis no presente estudo e manejo nutricional otimizado, particularmente em relação à disponibilidade de Ca trocável no solo. Essa superioridade é especialmente relevante considerando que o Ca atua como regulador de diversos processos fisiológicos, incluindo a divisão celular e a resposta a estresses abióticos.

O acúmulo de magnésio (Mg) na parte aérea do milho ANm 05 apresentou uma dinâmica linear positiva em função do acúmulo térmico, atingindo seu valor máximo de 90,46 kg ha⁻¹ no estágio E9 (1607 graus-dia), enquanto o milho forrageiro alcançou acúmulo máximo significativamente menor (42,07 kg ha⁻¹) em estágio fenológico mais precoce (1348 graus-dia) (Figura 20). Este padrão de absorção acompanhou diretamente a curva de acúmulo de matéria seca, comportamento similar ao observado para o cálcio, embora com magnitudes distintas entre os tipos de milho.

Figura 20 – Acúmulo total de magnésio na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



A disponibilidade adequada de Mg no solo ($2,27 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), considerada ótima, segundo a classificação de Alvarez V. *et al.* (1999), provavelmente contribuiu para a eficiente absorção deste nutriente, particularmente na cultivar ANm 05. O comportamento linear observado reflete o papel fundamental do Mg como componente central da molécula de clorofila (Epstein; Bloom, 2005), ativador de enzimas-chave do metabolismo energético (Marschner, 1995), e regulador da síntese de fotoassimilados (Cakmak; Kirkby, 2008), processos que ocorrem continuamente durante todo o ciclo da cultura.

A diferença significativa no acúmulo entre as cultivares pode ser explicada por três fatores principais: (1) maior demanda fisiológica do milho grão ANm 05 devido à necessidade de sustentar o enchimento de grãos até estádios mais tardios (E9) (Pujarula *et al.*, 2021); (2) diferenças genéticas na eficiência de utilização do nutriente (Yadav; Rai, 2013); e, (3) maior índice de área foliar mantido por mais tempo na cultivar ANm 05, conforme observado por Fancelli e Dourado-Neto (2000) em estudos com milho.

Comparando com dados da literatura, os valores obtidos superam os reportados por Oliveira *et al.* (2002) para milho forrageiro ($30\text{-}35 \text{ kg ha}^{-1}$), mas são consistentes com os achados de Cazetta *et al.* (2005) para condições de solo com teores adequados de Mg ($>1,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). A manutenção da absorção linear até o final do ciclo na ANm 05 ressalta a importância do suprimento contínuo deste nutriente, especialmente considerando seu papel na translocação de fotoassimilados para os grãos (Hermans; Verbruggen, 2004), enquanto no forrageiro a demanda concentra-se principalmente nas fases vegetativas.

Os resultados obtidos no presente estudo para o acúmulo de macronutrientes demonstram variações significativas quando comparados aos dados reportados na literatura para cultivos de milho. Rodrigues *et al.* (2012), avaliando diferentes coberturas vegetais, registraram acúmulos totais de 170, 28, 87, 76 e 58 kg ha^{-1} para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente. Valores distintos foram observados por Cazetta *et al.* (2005), que encontraram máximos de 265 (N), 32 (P), 156 (K), 63 (Ca) e 37 (Mg) kg ha^{-1} . Oliveira *et al.* (2002), ao estudarem a produção de fitomassa em milho, reportaram extrações máximas de 162,71 (N), 24,81 (P), 267,56 (K), 93,28 (Ca) e 53,80 (Mg) kg ha^{-1} . Já Matos *et al.* (2005), avaliando a capacidade extrativa do milho, observaram valores máximos de 253 (N), 29,4 (P), 316,54 (K), 36,38 (Ca) e 28,9 (Mg) kg ha^{-1} .

4.4 ACÚMULO DE MICRONUTRIENTES

A análise de variância para o acúmulo de micronutrientes nas cultivares ANm 05 e ANm 07 de milho revelou padrões distintos na dinâmica de absorção em função do acúmulo térmico (GDA) (Tabelas 8 e 9). Para ambas as cultivares, os graus-dia acumulados exerceram influência altamente significativa ($p < 0,01$) sobre todos os micronutrientes avaliados. Esses resultados evidenciam a significativa variação na absorção desses elementos ao longo do desenvolvimento fenológico das plantas.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de micronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 05, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado)

V	F	C	Quadrados Médios				
	L		B	Cu	Fe	Mn	Zn
loco	B	3	974,	205,	1264,2	37496	2620,
		92 ^{ns}	50 ^{ns}	7 ^{ns}	,57 ^{ns}	05 ^{ns}	
DA	G	8	9419	3008	23325	96507	25413
		7,62 ^{**}	3,05 ^{**}	19,14 ^{**}	4,82 ^{**}	0,86 ^{**}	
erro	E	2	1108	395,	10354,	16598	1171,
	4	,36	34	51	.37	41	
Média	M		192,	110,	823,06	560,4	224,4
		59	15		5	1	
V (%)	C		17,2	18,0	12,36	22,99	15,25
		9	5				

^{**} - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; GDA – Graus-dia acumulado; CV (%) – Coeficiente de variação.

Tabela 9 – Resumo da análise de variância para o acúmulo total de micronutrientes na parte aérea de plantas de milho ANm 07, submetido à adubação NPK, em função dos estádios de desenvolvimento (graus-dia acumulado).

FV	GL	Quadrados Médios				
		B	Cu	Fe	Mn	Zn
Bloco	3	397,01 ^{ns}	159,82 ^{ns}	20187,39 ^{ns}	16171,57 ^{ns}	275,00 ^{ns}
GDA	6	51034,04 ^{**}	15295,63 ^{**}	2049748,11 ^{**}	621609,89 [*]	50320,85 ^{**}
Erro	18	219,35	142,62	9063,43	7045,07	217,01
Média		108,87	48,89	617,41	343,70	97,43
CV (%)		13,60	24,42	15,42	24,42	15,12

^{**} - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; GDA – Graus-dia acumulado; CV (%) – Coeficiente de variação.

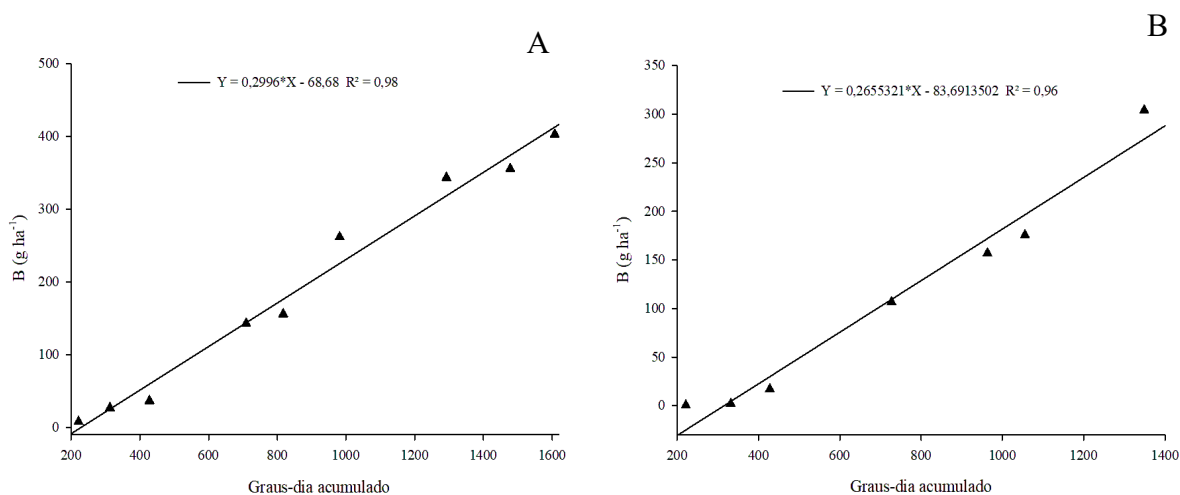
A cultivar ANm 05 demonstrou superioridade no acúmulo de todos os micronutrientes quando comparada à ANm 07, com diferenças particularmente expressivas para zinco (+130%),

cobre (+125%) e boro (+77%). Essa maior eficiência de absorção pode estar relacionada a características genéticas específicas, como maior desenvolvimento do sistema radicular ou expressão diferenciada de transportadores de micronutrientes, conforme descrito por Marschner (2012) em estudos com gramíneas.

As diferenças observadas entre as cultivares podem refletir distintas demandas fisiológicas associadas ao seu tipo de utilização - enquanto a ANm 05 (granífera) requer maiores quantidades de micronutrientes para sustentar o enchimento de grãos, a ANm 07 (forrageira) pode direcionar mais recursos para o crescimento vegetativo. Esses resultados destacam a importância do manejo nutricional diferenciado para cada cultivar, visando maximizar seu potencial produtivo.

O acúmulo de boro (B) na parte aérea do milho apresentou padrão linear crescente em resposta ao acúmulo térmico quando cultivado com 150% da recomendação de NPK (Figura 21). A cultivar granífera atingiu acúmulo máximo de 403,00 g ha⁻¹ aos 1607 graus-dia (E9), enquanto a ANm 07 alcançou 274,50 g ha⁻¹ em estágio fenológico mais precoce (1348 graus-dia).

Figura 21 – Acúmulo total de boro na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



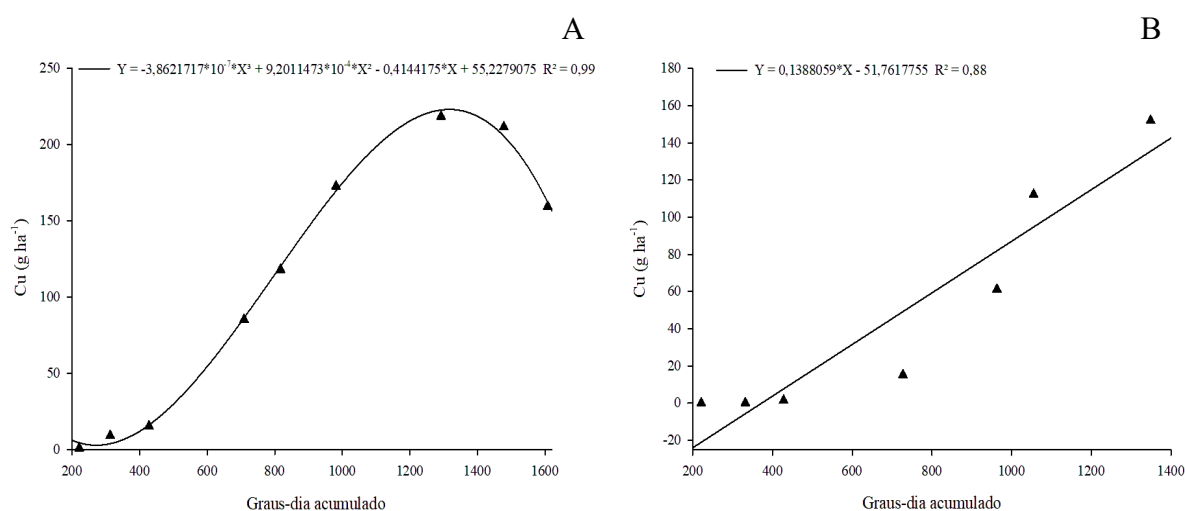
Essa variação pode ser atribuída à maior demanda fisiológica da cultivar granífera durante o enchimento de grãos, fase que requer intensa atividade do boro na formação da parede celular e no transporte de açúcares (Brown *et al.*, 2002). O comportamento linear observado reflete a baixa mobilidade do B no floema (Marschner, 1995), que limita sua redistribuição para novos tecidos, exigindo absorção contínua durante todo o ciclo vegetativo.

Os resultados obtidos alinham-se parcialmente com Rodrigues *et al.* (2012), que reportaram acúmulo de 415 g ha^{-1} em estudos com coberturas vegetais, porém superaram significativamente os $157,17 \text{ g ha}^{-1}$ observados por Oliveira *et al.* (2002). Essa discrepância pode ser explicada por três fatores principais: (1) diferenças na eficiência de uso do boro entre cultivares, conforme descrito por Dordas (2006) em trabalhos com cereais; (2) maior disponibilidade do nutriente no solo devido à adubação intensificada no presente estudo; e (3) condições climáticas favoráveis à absorção, já que a disponibilidade de B é altamente dependente da umidade do solo (Shorrocks, 1997).

Particularmente relevante é que ambas as cultivares mantiveram taxa constante de acúmulo até o final de seus respectivos ciclos, padrão consistente com o papel do boro na manutenção da integridade da membrana celular e no metabolismo fenólico durante a senescência (Camacho-Cristóbal *et al.*, 2008). A menor extração pela ANm 07 pode estar associada ao seu ciclo mais curto, que reduz o período de absorção ativa do nutriente, embora a diferença percentual sugira também variações genéticas na eficiência de utilização.

A dinâmica de acúmulo de cobre (Cu) no milho revelou padrões distintos entre as cultivares estudadas, sendo este o micronutriente menos demandado pela cultura (Figura 22). Para a cultivar granífera ANm 05, observou-se resposta quadrática em função do acúmulo térmico, com pico de extração de $223,12 \text{ g ha}^{-1}$ aos 1316 graus-dia, correspondendo ao estágio reprodutivo intermediário.

Figura 22 – Acúmulo total de cobre na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



Este padrão de acúmulo pode ser explicado pelo papel do Cu como cofator essencial em enzimas envolvidas nos processos de respiração (Citocromo C Oxidase) e detoxificação de

radicais livres (Superóxido Dismutase), cuja demanda é máxima durante o período de intensa atividade metabólica pré-florescimento (Yruela, 2005). A posterior redução no acúmulo reflete provavelmente a limitada redistribuição floemática deste nutriente (Marschner, 1995), combinada com a priorização fisiológica de outros micronutrientes durante o enchimento de grãos.

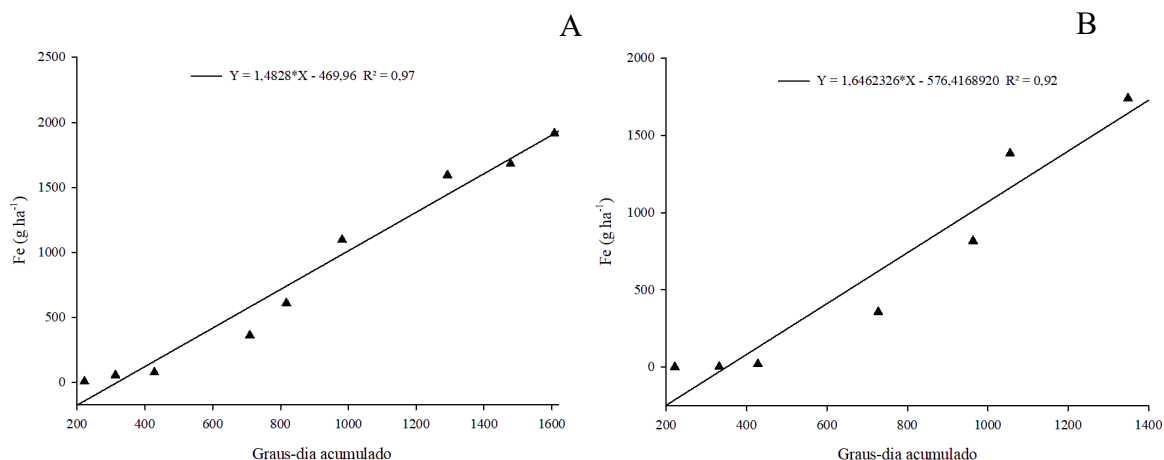
Em contraste, a cultivar forrageira ANm 07 apresentou comportamento linear crescente, atingindo 135,48 g ha⁻¹ ao final do ciclo, padrão que pode estar associado à sua menor exigência por processos enzimáticos relacionados à reprodução, mantendo, porém, demanda constante para manutenção da fotossíntese (plastocianina) e integridade celular durante o crescimento vegetativo (Burkhead *et al.*, 2009).

Os valores obtidos em ambos os materiais superaram significativamente os reportados por Oliveira *et al.* (2002), Rodrigues *et al.* (2012) e Teixeira *et al.* (2008), diferença que pode ser atribuída a múltiplos fatores, a citar: (1) a maior eficiência da cultivar na absorção de Cu, particularmente em virtude da alta disponibilidade do nutriente no solo; (2) o efeito sinérgico da adubação NPK elevada (150%) na ativação de transportadores de metais como COPT (Copper transporter) e ZIP (Zrt and Irt-like protein) (Sancenón *et al.*, 2004); e (3) condições edafoclimáticas favoráveis à solubilização de formas disponíveis de Cu no solo (Molina-Herrera; Romanyà, 2015).

A divergência nos padrões de acúmulo entre as cultivares reforça a necessidade de manejo diferenciado: aplicação antes do florescimento para a ANm 05 e manutenção da disponibilidade ao longo do ciclo para a ANm 07. Ressalta-se que, mesmo em pequenas quantidades, o Cu é essencial para enzimas do metabolismo do C e N (Andrés-Colás *et al.*, 2010).

O ferro (Fe) destacou-se como o micronutriente de maior demanda pelo milheto cultivado, com 150% da recomendação de NPK (Figura 23), apresentando padrão linear de acúmulo em ambas as cultivares estudadas. A cultivar granífera ANm 05 alcançou acúmulo máximo de 1915,76 g ha⁻¹ aos 1607 graus-dia (E9), enquanto a forrageira ANm 07 atingiu 1644,29 g ha⁻¹ em estágio fenológico mais precoce (1348 graus-dia), demonstrando aumento progressivo na concentração de Fe na matéria seca ao longo do ciclo.

Figura 23 – Acúmulo total de ferro na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



Esse comportamento linear contínuo pode ser explicado pelo papel central do ferro em processos fisiológicos essenciais, particularmente na biossíntese de clorofila e no funcionamento dos fotossistemas (Briat; Dubos; Gaymard, 2015), além de sua atuação como cofator enzimático em reações de transferência de elétrons na cadeia respiratória (Curie; Briat, 2003). A manutenção de taxas elevadas de acúmulo até o final do ciclo, especialmente na cultivar ANm 05, reflete a necessidade contínua deste nutriente para sustentar tanto o crescimento vegetativo quanto os processos reprodutivos, incluindo a formação e o enchimento de grãos (Zheng, *et al.*, 2010).

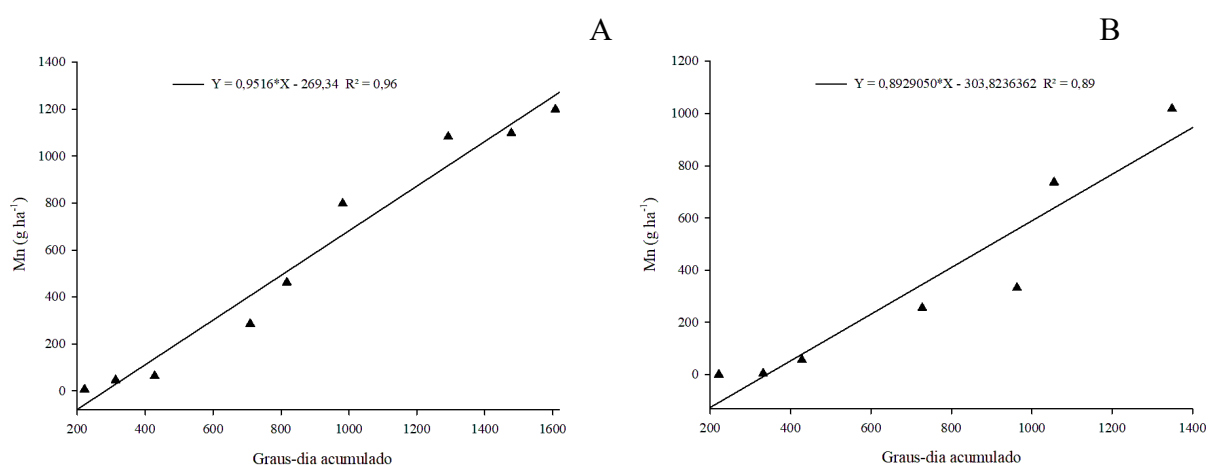
Os resultados obtidos demonstraram-se consistentes com os 1621,28 g ha⁻¹ reportados por Teixeira *et al.* (2008), corroborando o padrão de alta demanda por Fe em milho. As diferenças observadas entre as cultivares podem ser atribuídas a variações na eficiência de utilização do ferro, particularmente quanto à expressão diferencial de fitosideróforos - compostos quelantes secretados pelas raízes de gramíneas para facilitar a absorção de Fe³⁺ (Kobayashi; Nishizawa, 2012). A adubação NPK elevada provavelmente potencializou esse mecanismo, uma vez que a disponibilidade adequada de nitrogênio estimula a síntese de aminoácidos precursores dos fitosideróforos (Tagliavini; Rombolà, 2001).

O aumento progressivo na concentração de Fe na matéria seca, observado em ambos os materiais genéticos, sugere eficiente translocação e redistribuição do nutriente via floema, processo mediado por proteínas transportadoras como YSL (*Yellow Stripe-Like*) que garantem a mobilidade do ferro complexado com nicotianamina (Curie; Mari (2016). Esses achados reforçam a importância do manejo adequado da disponibilidade de ferro em solos cultivados com milho, especialmente considerando sua baixa mobilidade em condições de pH elevado e

a competição com outros cátions divalentes pelos sítios de absorção radicular (Guerinot; Yi, 1994).

O acúmulo de manganês (Mn) no milho cultivado com 150% da recomendação de NPK apresentou resposta linear crescente em função do acúmulo térmico, posicionando-se como o segundo micronutriente mais demandado pela cultura. A cultivar ANm 05 atingiu acúmulo máximo de 1199,42 g ha⁻¹ aos 1607 graus-dia (E9), enquanto a ANm 07 alcançou 900,67 g ha⁻¹ em estágio fenológico mais precoce (1348,96 graus-dia) (Figura 24).

Figura 24 – Acúmulo total de manganês na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



Esse padrão de acúmulo contínuo reflete o papel fundamental do Mn no complexo de evolução do oxigênio do fotossistema II e como ativador de enzimas-chave do metabolismo, como a superóxido dismutase Mn-dependente (MnSOD), crucial na defesa contra estresses oxidativos (Renger, 2012). A manutenção de taxas constantes de absorção ao longo do ciclo está associada à necessidade contínua deste nutriente tanto para processos fotossintéticos quanto para a síntese de lignina durante a formação da parede celular (Alscher *et al.*, 2002).

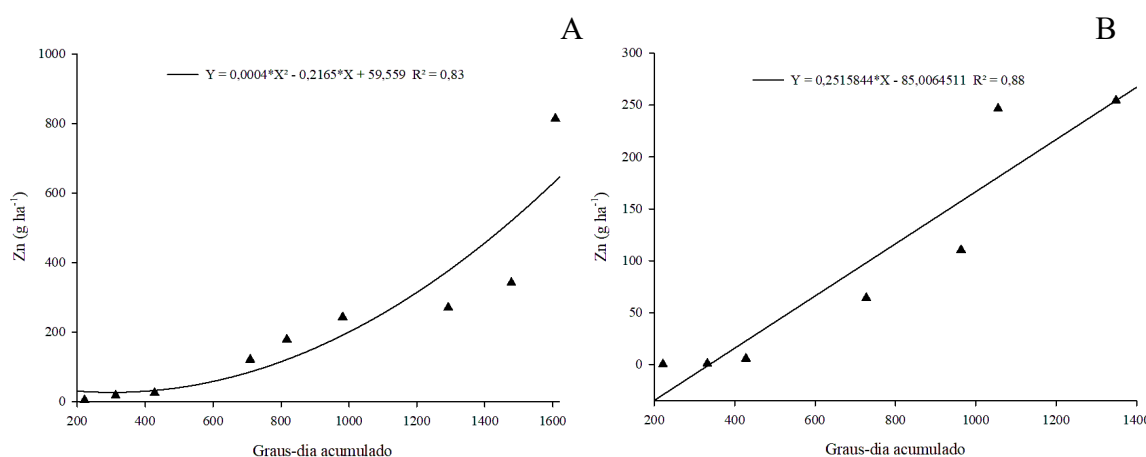
Os resultados obtidos situam-se entre os valores reportados por Oliveira *et al.* (2002) (1409,10 g ha⁻¹) e Rodrigues *et al.* (2012) (944 g ha⁻¹), diferenças que podem ser explicadas por variações na disponibilidade de Mn no solo, cuja absorção é altamente dependente do pH e do potencial redox; eficiência diferencial entre cultivares na ativação de transportadores como NRAMP (*Natural Resistance-Associated Macrophage Protein*) e ZIP (Pedas *et al.*, 2008); e interações com outros nutrientes, particularmente o ferro, que compete pelos mesmos sítios de absorção (Guerinot; Yi, 1994).

A adubação NPK elevada provavelmente favoreceu a disponibilidade de Mn²⁺, forma preferencialmente absorvida pelas plantas, através da acidificação rizosférica induzida pela

absorção de NH_4^+ . A menor acumulação pela ANm 07 pode estar relacionada ao seu ciclo mais curto, que reduz o período de atividade fotossintética ativa demandante de Mn, embora diferenças na eficiência de utilização entre materiais genéticos não possam ser descartadas, considerando a variabilidade na expressão de proteínas transportadoras de metais em gramíneas (Sasaki *et al.*, 2012).

O acúmulo de zinco (Zn) nas cultivares de milho ANm 05 e ANm 07 apresentou padrão linear crescente durante o ciclo fenológico, com as maiores taxas de absorção ocorrendo nas fases finais de desenvolvimento (Figura 25). A cultivar ANm 05 atingiu acúmulo máximo de $179,21 \text{ g ha}^{-1}$ na maturidade fisiológica (1607 graus-dia), enquanto a ANm 07 apresentou maior eficiência de acumulação, alcançando $254,37 \text{ g ha}^{-1}$ ao final do seu ciclo.

Figura 25 – Acúmulo total de zinco na parte aérea de plantas de milho ANm 05 (A) e ANm 07 (B), submetido à adubação NPK, em função do acúmulo térmico ao longo do ciclo fenológico



Esse comportamento de acúmulo progressivo está diretamente relacionado ao papel fundamental do Zn como cofator essencial para mais de 300 enzimas envolvidas em diversos processos metabólicos, incluindo a síntese de proteínas (RNA polimerases) e a produção de fitormônios como o triptofano, precursor do ácido indolacético (AIA) (Broadley *et al.*, 2007). A demanda crescente pelo nutriente nas fases reprodutivas pode ser atribuída à sua importância na formação e desenvolvimento dos grãos, onde atua na estabilização das membranas celulares e na proteção contra estresses oxidativos (Cakmak, 2000).

Os resultados obtidos demonstraram-se ligeiramente inferiores aos $292,41 \text{ g ha}^{-1}$ reportados por Oliveira *et al.* (2002) e aos $280,16 \text{ g ha}^{-1}$ observados por Teixeira *et al.* (2008), diferenças que podem refletir variações na disponibilidade do nutriente no solo ou na eficiência de utilização pelas diferentes cultivares estudadas.

A maior acumulação pela cultivar ANm 07, apesar de seu ciclo mais curto, sugere diferenças genéticas na expressão de transportadores de Zn, como as proteínas ZIP, que medeiam a absorção e translocação deste micronutriente nas plantas. A manutenção de taxas constantes de acúmulo até o final do ciclo em ambas as cultivares evidencia a importância do suprimento contínuo de Zn, particularmente em solos tropicais onde a disponibilidade deste nutriente é frequentemente limitada devido à adsorção em óxidos de ferro e alumínio (Alloway, 2008).

O padrão linear observado também reflete a eficiente redistribuição floemática do Zn, que, diferentemente de outros micronutrientes como o Fe e Mn, apresenta alta mobilidade na planta, podendo ser translocado para órgãos em crescimento ativo (Hacisalihoglu; Kochian, 2003).

5 CONCLUSÕES

1. Cultivares de milheto acumulam matéria seca, cálcio, magnésio, boro, cobre, ferro, manganês e zinco até próximo ao final do ciclo, quando são obtidos os acúmulos máximos. O acúmulo máximo de nitrogênio, fósforo e potássio ocorre no início da fase de enchimento de grãos.

2. A cultivar ANm 05 acumula maiores quantidades de matéria seca, fósforo, potássio, boro, cobre, ferro e manganês na parte aérea das plantas em comparação a cultivar ANm 07.

3. As plantas de milheto acumulam nutrientes em sua parte aérea na seguinte ordem decrescente de acúmulo: $K > N > Ca > Mg > P > Fe > Mn > B > Zn > Cu$.

4. As quantidades totais de nutrientes necessárias para produzir uma tonelada de matéria seca de milheto são: 7,8 a 13,52 kg de N; 1,10 a 1,65 kg de P; 8,52 a 18,48 kg de K; 4,6 a 8,92 kg de Ca; 2,33 a 2,97 kg de Mg; 0,01 kg de B; 0,007 kg de Cu; 0,06 a 0,09 kg de Fe; 0,03 a 0,05 kg de Mn; 0,005 a 0,01 kg de Zn.

5. A produção máxima de grãos da cultivar ANm 05 é de 4,49 Mg ha⁻¹, enquanto a cultivar ANm 07 produz até 56,09 Mg ha⁻¹ de biomassa verde quando colhida na fase de enchimento de grãos.

REFERENCIAS

AGROFIT. **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. 2022. Disponível em: <http://agrofit.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 15 jan. 2022.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. **Crop evapotranspiration**. Roma: FAO, 1998. 297p.

ALLOWAY, B. J. **Zinc in soils and crop nutrition**. 2. ed. Bruxelas: IZA, 2008.

ALMEIDA, M. C. R. *et al.* Crescimento vegetativo de cultivares de milho sob diferentes disponibilidades hídricas. **Revista Magistra, Cruz das Almas**, v. 29, n. 2, p. 161-171, abr. 2017.

ALSCHER, R. G.; ERTURK, N.; HEATH, L. S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 372, p. 1331-1341, maio 2002.

ALVAREZ V, V. H. *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. (org.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 359p.

AMARAL, J. F. T. *et al.* Eficiência de utilização de nutrientes por cultivares de cafeeiro. **Ciência Rural**, v. 41, n. 4, p. 621-629, abr. 2011.

ANDRÉS-COLÁS, N. *et al.* Deregulated copper transport affects Arabidopsis development especially in the absence of environmental cycles. **Plant Physiology**, v. 153, p. 170-184, 2010.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, n. 74, p. 430-445, 1959.

BELTAYEF, H. *et al.* Potential Piriformospora indica effect on growth and mineral nutrition of Phaseolus vulgaris crop under low phosphorus intake. **Journal of Plant Nutrition**, [S.l.], v. 44, n. 4, p. 498-507, 17 nov. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01904167.2020.1845366>

BONAMIGO, L. A. O plantio direto no cerrado do Mato Grosso do Sul. **Anais [...]. SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE PLANTIO DIRETO EM SISTEMAS SUSTENTÁVEIS**. Castro: Fundação ABC, 1993. p. 13-16.

BRAZ, A. J. B. *et al.* Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e Mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 2, p. 83-87, maio 2004.

BRIAT, J.-F.; DUBOS, C.; GAYMARD, F. Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 1, p. 33-40, 2015.

BROADLEY, M. R. *et al.* Zinc in plants. **New Phytologist**, [S.l.], v. 173, n. 4, p. 677-702, 7 fev. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>

BROWN, P. H. *et al.* Boron in plant biology. **Plant Biology**, v. 4, p. 205-223, 2002.

BURKHEAD, J. L. *et al.* Copper homeostasis. **New Phytologist**, v. 182, n. 4, p. 799-816, jun. 2009.

BUSO, W. H. D. *et al.* Produção e teor de matéria seca de milho cultivado sob diferentes doses e fontes de nitrogênio. **Anais [...]. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 35. Natal: SBCS, 2015. p. 1-4.

BUZETTI, S. *et al.* Resposta de cultivares de arroz a doses de nitrogênio e do regulador de crescimento cloreto de clorometat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1731-1737, 2006.

CAKMAK, I. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. **New Phytologist**, 146, 185-205. 2000.

CAKMAK I, KIRKBY E. A. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. **Physiol Plant.**;133(4):692-704. Aug 2008.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; REXACH, J.; GONZÁLEZ-FONTES, A. **Boron in plants: deficiency and toxicity**. J. Integr. **Plant Biol.**, v. 50, p. 1247-1255, 2008.

CARBERRY, P. S.; CAMPBELL, L.C.; BIDINGER, F. R. The growth and development of pearl millet as affected by plant population. **Field Crops Research**, [S.L.], v. 11, p. 193-205, jan. 1985. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-4290\(85\)90102-9](http://dx.doi.org/10.1016/0378-4290(85)90102-9)

CAVALCANTI, F. J. A. *et al.* **Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3. ed. Recife: IPA, 2008. 212 p.

CAZETTA, D. A. *et al.* Composição, produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milho e crotalária. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 575-580, 11 abr. 2005. Universidade Estadual de Maringá. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v27i4.1298>

CHAUDHARY R. *et al.* Millet biofortification for enhanced iron content: Roadmap for combating hidden hunger. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 19, 2025.

COSTA, A. C. T. *et al.* Unidades térmicas e produtividade em genótipos de milho semeados em duas épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 12, p. 1171-1177, dez. 2005.

COSTA, J. G. J. *et al.* Growth and gas exchange in millet under different doses and sources of nitrogen. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 7, p. e820974988, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4988>

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnostico do Município de Apodi, estado do Rio Grande do Norte. Recife, CPRM/PRODEEM, 2005.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P. Nutrição e produtividade do amendoim em sucessão ao cultivo de plantas de cobertura no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 42, n. 11, p. 1553-1560, nov. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2007001100006>

CURIE, C.; BRIAT, J. F. Iron transport and signaling in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 54, p. 183-206, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.135018>

CURIE, C.; MARI, S. New routes for plant iron mining. **New Phytologist**, [S.L.], v. 214, n. 2, p. 521-525, 5 dez. 2016. Wiley. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/nph.14364>

DIAS-MARTINS, A. M. *et al.* Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food Research International**, [S.L.], v. 109, p. 175-186, jul. 2018. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>

DOMUKOSKI, J. F. *et al.* Produção de Biomassa do Milheto em Função do Espaçamento Entrelinhas e da Densidade de Semeadura. **Scientia Agraria Paranaensis**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 152-160, 30 jun. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v13n2p152-160>

DORDAS, C. Foliar boron application improves seed set, seed yield and seed quality of alfalfa. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 907-913, 2006.

EPSTEIN, E. BLOOM, A. J. **Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2005.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FAGERIA, N. K. níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.3, p.390-395, 2000.

FAO-Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT 2022**: FAO statistical databases. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/pt/>. Acesso em: 18 mar. 2022.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. Cap. 12. p. 299-326.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt**: Pacote Experimental Designs (Português). R package version 1.2.2, 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>. Acesso em: 12 jun. 2024.

FOLONI, J. S. S.; CATUCHI, T. A.; BARBOSA, A. M.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S. Acúmulo de nutrientes e relação C/N em diferentes estádios fenológicos do milheto submetido à adubação nitrogenada. **Revista Agro@Mambiente On-Line**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 1, 7 jun. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i1.2798>

FONTELES, J. L. V. **Doses de adubação nitrogenada no cultivo do milho em ambiente semiárido**. 2018. 37 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Manejo de Solo e Água, Ufersa, Mossoró, 2018.

FRASCA, L. L. M. *et al.* Desempenho do milho submetido a lâminas de irrigação. **Revista JRG de Estudos Acadêmicos-Ano III**, v. III, n. 6, 2020.

GERALDO, J. *et al.* Diferenças em crescimento e produção de grãos entre quatro cultivares de milho Pérola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 35, n. 7, p. 1367-1376, jul. 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2000000700011>

GUERINOT, M. L.; YI, Y. Iron: nutritious, noxious, and not readily available. **Plant Physiology**, [S.l.], v. 104, n. 3, p. 815-820, 1 mar. 1994. Oxford University Press (OUP).

GUILHERME, L. R. G.; VALE, F. R.; GUEDES, G. A. **Fertilidade do solo: dinâmica e disponibilidade de nutrientes**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1995. 171 p.

GUIMARAES, C. V. *et al.* Desempenho de cultivares e híbridos de milho em solo submetido a compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 11, p. 1188-1194, nov. 2013.

HACISALIHOGU, G.; KOCHAN, L. V. How do some plants tolerate low levels of soil zinc? Mechanisms of zinc efficiency in crop plants. **New Phytologist**, [S.l.], v. 159, n. 2, p. 341-350, 18 jun. 2003. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00826.x>.

HERMANS, C.; VERBRUGGEN, N. Physiological characterisation of Mg deficiency in *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Experimental Botany**, v. 56, p. 2153-2161, 2005.

JORNADA, B. J. *et al.* Efeito da irrigação, épocas de corte da forragem e doses de nitrogênio sobre o rendimento de sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, [S.l.], v. 27, n. 2, p. 50-58, dez. 2005. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0101-31222005000200008>.

KARLEN, D. L.; FLANNERY, R. L.; SADLER, E. J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**, v. 80, p. 232-242, 1988.

KASSAM, A. H.; KOWAL, J. M. Water use, energy balance and growth of gero millet at Samaru, northern Nigeria. **Agricultural Meteorology**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 333-342, dez. 1975. Elsevier BV. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(75\)90030-8](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(75)90030-8).

KHAIRWAL, I. S.; RAM, C.; CHHABRA, A. K. **Pearl millet: seed production and technology**. New Delhi: Manohar, 1990. 208 p.

KLUTHCOUSKI, J. *et al.* **Manejo antecipado do nitrogênio nas principais culturas anuais**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2006.

KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N. K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, [S.l.], v. 63, n. 1, p. 131-152, 2 jun. 2012. Annual Reviews. DOI: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105522>.

LAMBERS, H.; OLIVEIRA, R. S. **Plant physiological ecology**. 3. ed. Cham: Springer, 2019.

LIRA, M. A. Cultura do milheto. *In*: Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária. **Cultura do milheto**: curso para extensionista agrícola. Fortaleza: BNB/ETENE/FUNDECI, 1982. p. 9-22.

LÓPEZ-ARREDONDO, D. L. *et al.* Phosphate nutrition: improving low-phosphate tolerance in crops. **Annual Review of Plant Biology**, [S.l.], v. 65, n. 1, p. 95-123, 29 abr. 2014. Annual Reviews. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035949>.

MAITI, R. K.; BIDINGER, F. R. **Growth and development of the pearl millet plant**. Patancheru: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1981.

MAJEROWICZ, N. *et al.* Estudo da eficiência de uso do nitrogênio em variedades locais e melhoradas de milho. **Revista Brasileira de Botânica**, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 129-136, jun. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-84042002000200002>.

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

MALAVOLTA, E.; CROCOMO, O. J. O potássio e a planta. *In*: YAMADA, T.; IGUE, K.; MUZILLI, O.; USHERWOOD, N. R. (ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 1982. p. 95-162.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MALTA, M. R. *et al.* Efeito da aplicação de zinco via foliar na síntese de triptofano, aminoácidos e proteínas solúveis em mudas de cafeeiro. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 14, n. 1, p. 1-8, jan. 2002.

MARCANTE, N. C.; CAMACHO, M. A.; JUNIOR, F. P. P. Teores de nutrientes no milheto como cobertura de solo. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 196-204, 2011.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta: I - produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 36, n. 5, p. 1553-1567, nov. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832012000500020>.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINS, K. V. **Metodologia para caracterizar a composição e a produção de matéria seca, e a extração e a correlação entre nutrientes na cultura do milheto**. 2015. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

MASETTO, T. E. *et al.* Potenciais hídricos e teores de água na germinação de sementes e crescimento inicial de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 619-630, 11 dez. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n3p619-630>.

MATOS, T. A. *et al.* Extração de nutrientes por forrageiras cultivadas com água residuária do beneficiamento de frutos do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 52, n. 303, p. 675-688, 2005.

MENEZES-BLACKBURN, D. *et al.* Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 427, n. 1-2, p. 5-16, 1 ago. 2017. Springer. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-017-3362-2>.

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

MOLINA-HERRERA, S.; ROMANYÀ, J. Synergistic and antagonistic interactions among organic amendments of contrasted stability, nutrient availability and soil organic matter in the regulation of C mineralisation. **European Journal of Soil Biology**, [S.l.], v. 70, p. 118-125, set. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.09.001>.

MORAES, R. M. *et al.* Acúmulo de massa seca e nutrientes na parte aérea do milho e o estágio mais adequado de manejo para fins de adubação verde. **Anais [...]. SEMINÁRIO DE AGROECOLOGIA DO MATO GROSSO DO SUL**, 2., 2008, Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. p. 1-4.

MORRILL, W. B. B. *et al.* Produção e nutrientes minerais de milho forrageiro e sorgo Sudão adubado com soro de leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 182-188, fev. 2012.

MOTA, F. D. **Modelo matemático para otimização na seleção de fertilizantes a aplicação via fertirrigação**. 2020. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2020.

MOUSAVI, S. R. Zinc in crop production and interaction with phosphorus. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, p. 1503-1509, 2011.

MURAKAMI, A. E. *et al.* Avaliação econômica e desempenho de frangos de corte alimentados com diferentes níveis de milho em substituição ao milho. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, [S.l.], v. 31, n. 1, p. 31-37, 22 maio 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actascianimsci.v31i1.5761>.

NICOLAU SOBRINHO, W. *et al.* Acúmulo de nutrientes nas plantas de milho em função da adubação orgânica e mineral. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 3, p. 107-110, jul. 2009.

NORMAN, M. J. T.; PEARSON, C. J.; SEARLE, P. G. E. Pearl millet (*Pennisetum glaucum*). In: NORMAN, M. J. T.; PEARSON, C. J.; SEARLE, P. G. E. (ed.). **The ecology of tropical food crops**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 164-184.

OLIVEIRA, G. A. **Genótipos de milho irrigados com água salina sob diferentes níveis de gesso agrícola**. 2018. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2018.

OLIVEIRA, T. K. *et al.* Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 37, n. 8, p. 1079-1087, ago. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2002000800005>

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

PADOVAN, M. P. *et al.* Dinâmica de acúmulo de massa e nutrientes pelo milho para fins de adubação verde em sistemas de produção sob bases ecológicas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 1, p. 95-103, 2012.

PALCHETTI, E. *et al.* Effects of nitrogen fertilization and plant density on proso millet (*Panicum miliaceum* L.) growth and yield under Mediterranean pedoclimatic conditions. **Agriculture**, [S.l.], v. 13, n. 9, p. 1657, 22 ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13091657>

PEREIRA FILHO, I. A. *et al.* **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 17 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 29).

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEREIRA, N. M. Z. *et al.* Disponibilidade de zinco para o milho afetada pela adição de Zn e pelo pH do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, p. 273-284, 2007.

PETRUCCI, V. P. **Marcha de absorção de nutrientes do milho granífero em cultivo hidropônico**. 2025. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025.

PRIESNITZ, R. **Influência do espaçamento entre linhas na fenologia, produtividade de biomassa e de grãos em genótipos de milho pérola**. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2009.

PUJARULA, V. *et al.* Genetic variation for nitrogen use efficiency traits in global diversity panel and parents of mapping populations in pearl millet. **Frontiers in Plant Science**, [S.l.], v. 12, p. 1-17, 4 fev. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2021.625915>

RACHIE, K. O.; MAJMUDAR, J. V. **Pearl millet**. Pennsylvania: Pennsylvania State University Press, 1980. 307 p.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: CERES/POTAFÓS, 1991. 343 p.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

RENGER, G. Mechanism of light induced water splitting in Photosystem II of oxygen evolving photosynthetic organisms. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, [S.l.], v. 1817, n. 8, p. 1164-1176, ago. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbabi.2012.02.005>

RENATO, N. S. *et al.* Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [S.l.], v. 28, n. 4, p. 382-388, dez. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862013000400004>

ROCHA, J. G. *et al.* Cinética de absorção de nitrogênio e acúmulo de frações solúveis nitrogenadas e açúcares em girassol. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, [S.l.], v. 44, n. 4, p. 381-390, dez. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-40632014000400009>

RODRIGUES, G. B. *et al.* Matéria e nutrientes da parte aérea de adubos verdes em cultivos exclusivo e consorciado. *Revista Ceres*, [S.l.], v. 59, n. 3, p. 380-385, jun. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0034-737x2012000300013>

ROSOLEM, C. A. *et al.* Nitrogen washing from C3 and C4 cover grasses residues by rain. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.l.], v. 34, n. 6, p. 1899-1905, dez. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000600014>

SANCENÓN, V. *et al.* The Arabidopsis copper transporter COPT1 functions in root elongation and pollen development. **Journal of Biological Chemistry**, [S.l.], v. 279, p. 15348–15355, 2004.

SANTANA JUNIOR, H. E. **Zoneamento agroecológico do município de Apodi/RN**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SANTOS, J. K. F. dos *et al.* Acúmulo de matéria seca e nutrientes pelo milheto cultivado sob doses de formulados NPK mineral e organomineral. **Research, Society and Development**, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 1-16, 9 maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i5.15126>

SANTOS, T. R. *et al.* Impacto da densidade do solo sobre o crescimento de variedades de milheto. **Multi-Science Journal**, [S.l.], v. 1, n. 13, p. 1-4, 13 jun. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.33837/msj.v1i13.626>

SASAKI, A. *et al.* Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice. **The Plant Cell**, [S.l.], v. 24, p. 2155-2167, 2012.

SCHEFFER-BASSO, S. M.; AGRANIONIK, H.; FONTANELI, R. S. Acúmulo de biomassa e composição bromatológica de milhetos das cultivares comum e africano. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 10, n. 4, p. 483-486, out./dez. 2004.

SHORROCKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. *In*: DELL, B.; BROWN, P. H.; BELL, R. W. (org.). **Boron in soils and plants: Reviews**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997. p.121-148.

- SILVA, K. da F. *et al.* Produção, clorofila e eficiência do uso da água em milho cultivado em solo de área degradada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 8, p. 573-584, 2015.
- SILVA, A. G. *et al.* Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura e cultivo da mamona em sucessão no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, [S.l.], v. 40, n. 10, p. 2092-2098, out. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782010001000007>
- SINGH, S. *et al.* Effect of sulphur on yield, nutrient uptake and economics of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) and lentil (*Lens culinaris*) grown in sequence on an alluvial soil. **The Indian Journal of Agricultural Sciences**, [S.l.], v. 86, n. 12, p. 1581-1585, 16 dez. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.56093/ijas.v86i12.65452>
- SORATTO, R. P. *et al.* Produção, decomposição e ciclagem de nutrientes em resíduos de crotalaria e milho, cultivados solteiros e consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 47, n. 10, p. 1462-1470, out. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2012001000008>
- SOTERO, A. R. H. **Cultivo de milho fertirrigado com água cinza**. 2019. 55 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.
- SOUZA, E. D. de *et al.* Fitomassa e acúmulo de nitrogênio em espécies vegetais de cobertura do solo para um Latossolo Vermelho distroférrico de Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 525-531, 2008. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i4.5313>
- SOUZA, H. A. de *et al.* Exportação e balanço de nutrientes de culturas agrícolas do Nordeste brasileiro. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2023.
- SYSTAT SOFTWARE, INC. **SigmaPlot for Windows**. Version 15. San Jose, CA, 2022.
- TAGLIAVINI, M.; ROMBOLÀ, A. D. Iron deficiency and chlorosis in orchard and vineyard ecosystems. **European Journal of Agronomy**, [S.l.], v. 15, p. 71-92, 2001.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TEIXEIRA, M. B. *et al.* Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 867-876, jun. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000300021>
- THEODORO, J. M. V. *et al.* Efeito da extrusão e germinação na caracterização química de milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.). **Anais [...]. SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DE ALIMENTOS E NUTRIÇÃO – SLACAN**, 15., 2023. Campinas: Galoá, 2023. Disponível em: <https://proceedings.science/slacan-2023/trabalhos/efeito-da-extrusao-e-germinacao-na-caracterizacao-quimica-de-milho-pennisetum?lang=en>. Acesso em: 9 jan. 2025.
- TRINDADE, J. S. *et al.* Produtividade do milho em três densidades de semeadura e duas alturas de corte. **Ciência Animal Brasileira**, v. 18, p. 1-10, 21 ago. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1089-6891v18e-41239>

VASCONCELLOS, C. A.; VIANA, M. C. M.; FERREIRA, J. J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período de inverno-primavera. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 11, p. 1835-1845, 1998.

VILELA, R. G. *et al.* Manejos do milheto e doses de nitrogênio na cultura do milheto em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Milheto e Sorgo**, v. 11, n. 3, p. 234-242, 30 dez. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v11n3p234-242>

XU, E. *et al.* Molecular mechanisms of plant responses to copper: from deficiency to excess. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, n. 13, p. 6993, 26 jun. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms25136993>

YADAV, O. P.; RAI, K. N. Genetic improvement of pearl millet in India. **Agricultural Research**, v. 2, n. 4, p. 275-292, 20 nov. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s40003-013-0089-z>

YRUELA, I. Copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 17, p. 145-156, 2005.

ZHENG, Y. *et al.* Mechanochemical activation of iron ore tailings and preparation of high-strength construction materials. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, v. 32, n. 4, p. 504-508, 2010.

ZHOU, D. *et al.* OsPLS4 is involved in cuticular wax biosynthesis and affects leaf senescence in rice. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1-16, 11 jun. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2020.00782>

ANEXOS

Anexo A. Valores médios de acúmulo de matéria seca total (Mg ha^{-1}) da parte aérea nas combinações de doses de adubação NPK e dos estádios de desenvolvimento para milho ANm 05.

Doses	Estádios de desenvolvimento								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
0	0,30 Ac	0,42 Ac	0,70 Ac	1,85 Cc	3,10 Cbc	5,37 Dab	5,96 Ca	6,92 Ca	8,05 Da
50	0,46 Ae	1,37 Ae	1,46 Ae	5,52 Bd	7,49 BCd	10,95 Cc	17,05 Bb	21,84 Ba	22,66 Ca
100	0,50 Ad	1,45 Ad	2,04 Ad	6,39 ABc	8,65 Bc	15,44 Bb	24,00 Aa	25,83 Aa	26,12 Ba
150	0,511 Af	2,10 Af	2,16 Af	8,27 Ae	11,98 Ad	19,17 Ac	25,88 Ab	26,41 Ab	30,45 Aa

Anexo B. Valores médios de acúmulo de matéria seca total (Mg ha^{-1}) da parte aérea nas combinações de doses de adubação NPK e dos estádios de desenvolvimento para milho ANm 07.

Doses	Estádios de desenvolvimento						
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
0	0,011Ac	0,046 Ac	0,58 Ac	4,30 Cb	4,90 Db	5,26 Db	10,85 Da
50	0,014 Ad	0,096 Ad	0,87 Ad	5,70 Cc	7,75 Cb	9,14 Cb	12,52 Ca
100	0,015 Ad	0,11 Ad	0,92 Ad	10,00 Bc	10,55 Bc	13,20 Bb	14,96 Ba
150	0,02 Ad	0,14 Ad	0,96 Ad	12,34 Ac	15,08 Ab	17,78 Aa	18,00 Aa

Médias seguidas de letras maiúsculas diferenciam as doses de adubação, dentro de cada estágio de desenvolvimento, e seguidas de letras minúsculas diferenciam os estádios de desenvolvimento, dentro de cada nível de adubação, de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$).